



**Politecnico  
di Torino**

**POLITECNICO DI TORINO**

**Dipartimento di Ingegneria dell’Ambiente, del Territorio e delle  
Infrastrutture (DIATI)**

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE**

# **Approccio Scan2BIM per il monitoraggio e la manutenzione di un sottopasso stradale**

**Relatori:**

Prof. Marco Piras  
Prof.ssa Anna Osello

**Candidato:**

Massimiliano Antonini

**Co-relatori:**

Ing. Nives Grasso  
Ing. Daniel Rodriguez Polania

**Aprile 2024**

## ABSTRACT

La manutenzione delle infrastrutture sta diventando sempre più importante e attuale per il settore dell'AEC (Architecture, Engineering, Construction); molte delle infrastrutture, anche quelle più recenti, si trovano in gravi condizioni di deterioramento e di invecchiamento. Queste richiedono, quindi, importanti lavori di manutenzione e di rinnovo e, se trascurate, possono diventare pericolose e inefficaci per gli utenti. Il monitoraggio e la manutenzione delle infrastrutture dovrebbero essere programmati e pianificati nel tempo in modo che i lavori di risanamento e ripristino possano essere completati rapidamente. Spesso, infatti, la mancanza di funzionalità di un'opera infrastrutturale di una certa rilevanza ha un effetto significativo sulla mobilità nell'area circostante. Inoltre, è essenziale preservare le infrastrutture esistenti per soddisfare la domanda sempre più crescente e per ridurre il rischio di guasti imprevisti e gli impatti di eventi estremi oltre al fatto di essere più sostenibile ed economico rispetto alla costruzione di nuove opere.

Per soddisfare queste necessità, il Building Information Modeling (BIM), in particolare il BIM applicato alle infrastrutture (InfraBIM), sta diventando sempre più rilevante durante la fase di gestione e manutenzione, poiché ha già dato modo di far apprezzare i vantaggi nel gestire diversi tipi di dati contemporaneamente e nell'archiviare le informazioni utili durante le fasi di progettazione e realizzazione di un'infrastruttura.

In particolare, lo Scan2BIM, si pone come tecnica di rilievo e di caratterizzazione dell'opera esistente e dei vari elementi che la compongono in grado di creare un Digital Twin (modello digitale) con un accurato livello di dettaglio. Per questo motivo, il presente lavoro di ricerca verifica l'applicabilità di questa metodologia in un caso studio reale, il sottopassaggio Lingotto della città di Torino. Nella prima parte dello studio, partendo da dati di un rilievo Laser Scanner del sottopasso si è proceduto all'elaborazione delle nuvole di punti.

Nella seconda parte, dopo una filtratura e ricampionamento della nuvola di punti, è stato sviluppato un modello BIM del primo tratto, integrato e interoperabile, che contiene tutti i dati utili per il Facility Management, ed è stato esportato in formato aperto IFC (Industry Foundation Classes) per la visualizzazione e l'ispezione virtuale tramite l'ausilio della Realtà Virtuale. Il contributo che tale elaborato di tesi intende fornire è mostrare come la metodologia Scan2BIM applicata alle infrastrutture esistenti possa essere un valido aiuto durante la fase di esercizio e manutenzione

(O&M); i risultati di questo lavoro mostrano, però, come, a causa di problemi di interoperabilità tra i software di gestione dei dati Laser scanner e i software BIM, per passare da un rilievo ad un modello Digital Twin sia necessario un'importante preelaborazione dei dati manuale e solo con l'ausilio delle nuove tecnologie sarà possibile velocizzare, standardizzare e automatizzare.

Tuttavia, questa ricerca dimostra come tale metodologia possa rappresentare uno strumento utile che consenta a coloro che partecipano ai processi ispettivi e manutentivi di una galleria una manutenzione semplice, veloce ed efficiente.

**Keywords:** Laser Scanner, Point Cloud, Scan2BIM, InfraBIM, Digital Twin, Facility Management, Virtual Reality.

## Sommario

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduzione.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1. Stato dell'arte delle infrastrutture civili in Italia e inquadramento normativo sulla loro manutenzione .....</b> | <b>3</b>  |
| 1.1 Manutenzione delle infrastrutture.....  | 6         |
| 1.2 Linea guida e normativa per la classificazione e la gestione del rischio delle gallerie esistenti...                | 8         |
| 1.3 Gallerie stradali in ambito urbano .....  | 13        |
| 1.4 Manutenzione delle gallerie stradali .....  | 15        |
| <b>2. BIM per la manutenzione delle infrastrutture .....</b>  | <b>24</b> |
| 2.1 Cos'è il BIM.....   | 24        |
| 2.2 Origini del BIM.....  | 24        |
| 2.3 Evoluzione del BIM e quadro normativo .....   | 24        |
| 2.3.1 Contesto Normativo .....  | 26        |
| 2.4 Potenzialità del BIM .....  | 30        |
| 2.5 Applicazioni BIM nel monitoraggio e nella manutenzione delle infrastrutture.....                                    | 34        |
| <b>3. Tecnologie e tecniche di rilievo Laser Scanner.....</b>   | <b>41</b> |
| 3.1 Laser Scanner.....  | 42        |
| 3.1.1 Tipologie di strumenti laser scanner.....   | 43        |
| 3.1.2 Caratteristiche dei laser scanner.....  | 51        |
| 3.2 Pianificazione del rilievo con laser scanner .....  | 52        |
| 3.3 Operazioni di rilievo .....   | 54        |
| 3.4 Trattamento dei dati laser scanner.....   | 55        |
| 3.5 Stazione Totale.....  | 57        |
| 3.6 Tecniche di rilievo MMS per gallerie.....   | 60        |
| <b>4. SCAN-TO-BIM .....</b>   | <b>64</b> |
| 4.1 Definizione SCAN-TO-BIM .....   | 64        |
| 4.2 Perché il SCAN-TO-BIM .....   | 65        |
| 4.3 Campi di applicazione SCAN-TO-BIM .....   | 65        |
| 4.4 I vantaggi del SCAN-TO-BIM.....   | 67        |
| 4.5 LOD e Livello di fabbisogno informativo .....   | 67        |
| <b>5. Caso studio: sottopassaggio Lingotto .....</b>  | <b>76</b> |
| 5.1 Inquadramento del caso studio.....  | 76        |
| 5.1.1 Cenni storici.....  | 76        |
| 5.1.2 Interventi di manutenzione frequenti del sottopasso lingotto .....  | 79        |
| 5.1.3 L'urbanizzazione del grattacielo Regione Piemonte e la nuova viabilità collegata al sottopasso .....              | 80        |
| 5.1.4 Il sottopasso del Lingotto tra le infrastrutture con priorità di intervento .....                                 | 82        |
| 5.2 Obiettivi del lavoro di tesi .....  | 86        |
| <b>6. Acquisizione ed elaborazione dati Laser Scanner .....</b>   | <b>89</b> |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>6.1</b> | <b>Acquisizione dei dati tramite LIDAR.....</b>   | <b>89</b>  |
| <b>6.2</b> | <b>Elaborazione delle nuvole di punti mediante software RiSCAN PRO® .....</b>                       | <b>101</b> |
| <b>6.3</b> | <b>Georeferenziazione delle scansioni tramite software RiSCAN PRO® .....</b>                        | <b>102</b> |
| 6.3.1      | Importazione dei dati LiDAR.....  | 103        |
| 6.3.2      | Definizione dei sistemi di coordinate caratterizzanti i dati di input e di output .....             | 103        |
| 6.3.3      | Visualizzazione dei dati in vista 3D.....   | 103        |
| 6.3.4      | Identificazione dei target retroriflettenti .....   | 104        |
| <b>6.4</b> | <b>Registrazione delle nuvole di punti.....</b>   | <b>107</b> |
| 6.4.1      | Registrazione delle scansioni .....   | 107        |
| <b>6.5</b> | <b>Colorazione delle nuvole di punti .....</b>  | <b>112</b> |
| 6.5.1      | Calibrazione della fotocamera e colorazione delle nuvole di punti. ....                             | 112        |
| <b>6.6</b> | <b>Filtratura e ricampionamento tramite Cloud Compare.....</b>                                      | <b>117</b> |
| 6.6.1      | Importazione in CloudCompare delle singole nuvole di punti .....                                    | 117        |
| 6.6.2      | Filtratura e pulitura delle nuvole di punti .....   | 117        |
| 6.6.3      | Unione.....   | 118        |
| 6.6.4      | Sottocampionamento della nuvola di punti 3D.....  | 118        |
| 6.6.5      | Definizione di un sistema di coordinate locale e dell’asse longitudinale del tunnel.....            | 118        |
| 6.6.6      | Estrazione delle sezioni significative in Cloud Compare ed esportazione della nuvola di punti ..... | 120        |
| <b>7.</b>  | <b><i>Preelaborazione dati per modello BIM in Autodesk ReCap Pro e Revit .....</i></b>              | <b>122</b> |
| 7.1        | Importazione in Recap Pro .....   | 122        |
| 7.2        | Importazione in Revit .....   | 125        |
| <b>8.</b>  | <b><i>Sviluppo del modello 3D BIM.....</i></b>  | <b>127</b> |
| 8.1        | Metodologia BIM applicato al Caso Studio .....  | 127        |
| 8.2        | Modello strutturale del tunnel .....  | 127        |
| 8.2.1      | Modellazione della galleria tramite Dynamo .....  | 134        |
| 8.3        | Modellazione degli elementi del tunnel.....   | 138        |
| 8.3.1      | New Jersey .....  | 142        |
| 8.3.2      | Dispositivi di illuminazione.....   | 146        |
| 8.3.3      | Segnaletica Verticale .....   | 152        |
| 8.3.4      | Collocazione degli elementi all’interno del modello strutturale del sottopasso.....                 | 153        |
| 8.4        | Modello completo del tunnel in Revit ed esportazione in formato IFC.....                            | 155        |
| 8.5        | Visualizzazione e ispezione in realtà virtuale del modello IFC con la nuvola di punti .....         | 162        |
| <b>9.</b>  | <b><i>Conclusioni e sviluppi futuri.....</i></b>  | <b>170</b> |
|            | <b><i>Bibliografia .....</i></b>  | <b>172</b> |
|            | <b><i>Sitografia .....</i></b>  | <b>174</b> |
|            | <b><i>Ringraziamenti.....</i></b>   | <b>176</b> |

## Indice delle figure

|  |    |
|--|----|
| Figura 1-1 Chilometri di infrastruttura viaria in Italia per tipologia di gestore [S5] .....   | 4  |
| Figura 1-2 Gli impatti degli investimenti del MIT sugli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030 (Fonte: <a href="https://mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/notizia/2021-07/Presentazione%20Allegato%20Infrastrutture%20DEF_DEF.pdf">https://mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/notizia/2021-07/Presentazione%20Allegato%20Infrastrutture%20DEF_DEF.pdf</a> ).....                        | 7  |
| Figura 1-3 Archivio Informatico Nazionale delle Opere Pubbliche (AINOP) (Fonte, [S9]).....   | 9  |
| Figura 1-4 Opera infrastrutturale pubblica censita nell'AINOP nell'area del caso studio.....   | 9  |
| Figura 1-5 Approccio multilivello e relazione tra i livelli di analisi (Fonte: Linea Guida, 2023).....   | 12 |
| Figura 1-6 Interventi di manutenzione di una galleria con chiusura parziale di una corsia. ....  | 19 |
| Figura 1-7 Interventi di manutenzione di una galleria con chiusura di entrambi i sensi di circolazione. ....   | 19 |
| Figura 1-8 Interventi di manutenzione della volta di un tunnel stradale con chiusura completa. ...   | 20 |
| Figura 2-1 Triangolo di Bew: livelli di maturità digitale del BIM (Fonte, <a href="https://biblus.acca.it/livelli-di-maturita-bim/">https://biblus.acca.it/livelli-di-maturita-bim/</a> ).....   | 25 |
| Figura 2-2 Ciclo di vita di un'opera (Fonte, <a href="https://www.innexhub.it/building-information-modeling/">https://www.innexhub.it/building-information-modeling/</a> ).....  | 31 |
| Figura 2-3 Le dimensioni del BIM, Fonte <a href="https://biblus.acca.it/le-dimensioni-del-bim/">https://biblus.acca.it/le-dimensioni-del-bim/</a> .....  | 32 |
| Figura 2-4 Parametri 4D e 5D di un elemento infrastrutturale in BIM (Fonte Anas S.p.A.). ....  | 32 |
| Figura 2-5 Infrastructure Asset Management, Fonte [S10]. ....  | 38 |
| Figura 2-6 Asset al centro del processo gestionale (Fonte Anas S.p.A.).....  | 38 |
| Figura 2-7 Esclusione dall'obbligatorietà degli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria (ad eccezione delle opere precedentemente eseguite con l'uso del BIM nel Decreto Legislativo 36/2023 e nel precedente Codice dei Contratti Pubblici (D.Lgs. n.50/2016), (Fonte Anas S.p.A.). ...  | 39 |
| Figura 2-8 Metodologia BIM vs tradizionale - MacLeamy curve Effort (Fonte Anas SpA). ....  | 39 |
| Figura 3-1 Strumenti e tecniche per rilievi e misure 3D (Fonte, F. Remondino, 3D surveying and modelling of complex architectural sites and heritage objects, Archeologia e Calcolatori, 22, 2011.). ....  | 41 |
| Figura 3-2 Schema di funzionamento dei laser scanner triangolatori basato sul metodo della triangolazione. ....  | 44 |
| Figura 3-3 Determinazione dello sfasamento $\varphi$ tra l'onda trasmessa e quella ricevuta. ....  | 46 |
| Figura 3-4 Percorso di andata e ritorno del laser. ....  | 46 |
| Figura 3-5 Calcolo del tempo di volo $\Delta t$ . ....   | 47 |
| Figura 3-6 Stima dei tempi residui in funzione della tensione. ....  | 48 |
| Figura 3-7 Laser scanner Riegl VZ1000 e sistema di coordinate interno allo strumento (ICS).....  | 48 |
| Figura 3-8 Schematizzazione della variazione della precisione della misura in funzione della portata nei laser scanner. (Fonte, <a href="https://www.ingenio-web.it/articoli/guida-alla-comprensione-e-all-uso-dei-sistemi-laser-scanner-terrestri-o-tls/">https://www.ingenio-web.it/articoli/guida-alla-comprensione-e-all-uso-dei-sistemi-laser-scanner-terrestri-o-tls/</a> ). ....          | 49 |
| Figura 3-9 Schematizzazione della variazione della precisione della misura in funzione delle dimensioni dell'oggetto da rilevare. (Fonte, <a href="https://www.ingenio-web.it/articoli/guida-alla-comprensione-e-all-uso-dei-sistemi-laser-scanner-terrestri-o-tls/">https://www.ingenio-web.it/articoli/guida-alla-comprensione-e-all-uso-dei-sistemi-laser-scanner-terrestri-o-tls/</a> )..... | 50 |
| Figura 3-10 Organigramma del trattamento dati laser scanner [3.X]. ....  | 55 |
| Figura 3-11 Esempio di rilievo eseguito con tecnica laser scanner (terrestre + UAV) di un viadotto stradale; a sinistra il manufatto con il laser scanner terrestre VZ400i RIEGL a destra il manufatto e il drone utilizzato (Fonte, ConsulCAD S.r.l.).....  | 56 |
| Figura 3-12 Esempio di nuvola di punti ottenuta di un viadotto stradale seguendo la procedura di elaborazione dati all'interno del software RiSCAN PRO (Fonte, ConsulCAD S.r.l.). ....   | 57 |
| Figura 3-13 Misura di angoli orizzontali e verticali con stazione totale. ....   | 57 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3-14 Esempio di Stazione Totale (Leica TS60).....   | 58 |
| Figura 3-15 Misura di distanze e angoli con stazione totale a.....   | 59 |
| Figura 3-16 Esempio di drone per spazi confinati con gabbia di protezione (elios2).....  | 61 |
| Figura 3-17 Esempio di MMV ARCHITA per gallerie ferroviarie (a sinistra) e stradali (a destra) [21].<br>.....  | 61 |
| Figura 3-18 Configurazione di ARCHITA [21]. ....   | 62 |
| Figura 3-19 Informazioni simultanee e integrate acquisite con ARCHITA. Nuvola di punti (a sinistra),<br>immagini provenienti dal sistema di acquisizione termografico (al centro) e fotografico (a destra)<br>[21]. ....   | 62 |
| Figura 3-20 Il puzzle-chart della metodologia e delle milestone del MIRET [21]. ....   | 63 |
| Figura 4-1 Level of Development (LOD) secondo la classificazione del BIMforum (Fonte,<br><a href="https://www.infobuild.it/approfondimenti/bim-rivoluzione-digitale-edilizia-building-information-modeling/">https://www.infobuild.it/approfondimenti/bim-rivoluzione-digitale-edilizia-building-information-modeling/</a> ).....  | 69 |
| Figura 4-2 Illustrazione dei quattro differenti livelli di dettaglio (LOD) per tunnel.....   | 69 |
| Figura 4-3 Flusso di dati nel processo digitale attraverso i LOD degli oggetti.....  | 70 |
| Figura 4-4 UNI 11337: esempio di LOD per l'elemento finestra (Fonte, <a href="https://www.ingenio-web.it/articoli/i-loi-nelle-scale-di-lod-usa-uk-ita/">https://www.ingenio-web.it/articoli/i-loi-nelle-scale-di-lod-usa-uk-ita/</a> ).....  | 71 |
| Figura 4-5 LOD italiani, UK e USA a confronto e fasi previste dal codice dei Contratti Pubblici. ....  | 71 |
| Figura 4-6 Prerequisiti e livello di fabbisogno informativo. (Fonte, <a href="https://www.ingenio-web.it/articoli/nuova-norma-uni-en-17412-1-dai-lod-al-livello-di-fabbisogno-informativo/">https://www.ingenio-web.it/articoli/nuova-norma-uni-en-17412-1-dai-lod-al-livello-di-fabbisogno-informativo/</a> ).....  | 73 |
| Figura 4-7 Rapporto tra volume e valore delle informazioni (Fonte, D Moody and P.Walsh,<br>"Measuring The Value Of Information: An Asset Valuation Approach," in Seventh European<br>Conference on Information Systems (ECIS'99), 1999, pp. 1-17).....   | 74 |
| Figura 5-1 Planimetria dell'area sud di Torino: all'interno del riquadro rosso è indicato il tratto del<br>sottopasso scelto come caso studio (tra Piazza Filzi e la rotonda Lingotto). ....   | 76 |
| Figura 5-2 Sottopassaggio Lingotto, Via Nizza, Torino, vista del cantiere da est durante gli scavi,<br>1933, stampa alla gelatina bromuro d'argento. (Fonte <a href="http://www.fondazionetorinomusei.it">www.fondazionetorinomusei.it</a> , Mario<br>Gabinio).....  | 77 |
| Figura 5-3 Sottopassaggio Lingotto, Via Nizza, Torino, vista da est dell'opera ultimata, 10-1933,<br>stampa alla gelatina bromuro d'argento. (Fonte <a href="http://www.fondazionetorinomusei.it">www.fondazionetorinomusei.it</a> , Mario Gabinio). ....  | 77 |
| Figura 5-4 Sottopassaggio Lingotto, Via Nizza, Torino, interno, vista assiale in controluce nei pressi<br>di un imbocco, 01/12/1933, stampa alla gelatina bromuro d'argento. (Fonte<br><a href="http://www.fondazionetorinomusei.it">www.fondazionetorinomusei.it</a> , Mario Gabinio).....  | 77 |
| Figura 5-5 Sottopassaggio Lingotto, Via Nizza, Torino, vista generale notturna dall'imbocco<br>orientale dell'interno illuminato, 10-1933, stampa alla gelatina bromuro d'argento. (Fonte<br><a href="http://www.fondazionetorinomusei.it">www.fondazionetorinomusei.it</a> , Mario Gabinio).....  | 78 |
| Figura 5-6 Sottopassaggio Lingotto, Via Nizza, Torino, interno, vista assiale nei pressi di una bocca<br>di luce, 27/12/1933, stampa alla gelatina bromuro d'argento. (Fonte<br><a href="http://www.fondazionetorinomusei.it">www.fondazionetorinomusei.it</a> , Mario Gabinio).....   | 78 |
| Figura 5-7 Sottopassaggio Lingotto, Via Nizza, Torino, interno, vista di scorcio nei pressi di una<br>bocca di luce, 10-1933, stampa alla gelatina bromuro d'argento. (Fonte<br><a href="http://www.fondazionetorinomusei.it">www.fondazionetorinomusei.it</a> , Mario Gabinio).....   | 78 |
| Figura 5-8 Estratto dell'articolo tratto dall'archivio storico la stampa 20 marzo 1996 n.79 pagina 33<br>[S15]. ....   | 79 |
| Figura 5-9 Confronto tra il passato e il presente - Foto a sinistra: tram in Via Nizza, Torino, 1970<br>(Fonte Fondazione Istituto Piemontese Antonio Gramsci - Archivio storico (R0166260 006.017)<br>Foto a destra: Vuoto urbano, sottopasso chiuso, aree industriali dismesse, 2020 (Fonte<br><a href="http://www.gramscitorino.it">http://www.gramscitorino.it</a> , Francesca Macciò). .... | 79 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5-10 La planimetria della nuova viabilità (in verde) che si collega al sottopasso lingotto tramite due rotatorie interrate, rotatoria Regione e Rotatoria Lingotto rispettivamente a sinistra e a destra nell'immagine [18].                         | 80 |
| Figura 5-11 Rotatoria Lingotto interrata e sopraelevata rispettivamente a sinistra e a destra della figura.   | 81 |
| Figura 5-12 Posa della maxi-cupola in acciaio [S18]   | 81 |
| Figura 5-13 Posa della maxi-cupola in acciaio [S18]   | 82 |
| Figura 5-14 Lavori di rifacimento del piano stradale e sostituzione dei dispositivi di ritenuta [S17].  | 83 |
| Figura 5-15 Cartello di cantiere Torino 2030 Rinforzo strutturale e risanamento conservativo dei ponti cittadini Lotto 2 2021.  | 83 |
| Figura 5-16 Il sottopassaggio del Lingotto allagato dal temporale, Torino 4 agosto 1970 (Fonte, <a href="https://archivi.polodel900.it/R0166260009.027">https://archivi.polodel900.it/R0166260009.027</a> ).  | 84 |
| Figura 5-17 Lavori manutenzione impalcato sotto Via Nizza.  | 84 |
| Figura 5-18 Lavori di ripristino, impermeabilizzazione e conservazione sopra e sotto l'impalcato di Via Nizza.  | 85 |
| Figura 5-19 Lavori impalcato sotto Via Nizza.   | 85 |
| Figura 5-20 Lavori di manutenzione nella semicarreggiata da Corso Giambone a Via Nizza (novembre 2023).   | 85 |
| Figura 5-21 Semicarreggiata da Corso Giambone a Via Nizza chiusa per lavori di manutenzione straordinaria (novembre 2023).  | 86 |
| Figura 5-22 Workflow applicato al caso studio.  | 86 |
| Figura 5-23 Segnaletica stradale verticale (segnale "limite di velocità 50 km/h" a sinistra e segnale "attenzione viabilità modificata" a destra).  | 87 |
| Figura 5-24 Dispositivi di illuminazione, derivatori, staffe passerella cavi, passerella cavi, porte e pannelli fonoassorbenti presenti lungo il sottopasso Lingotto.   | 87 |
| Figura 5-25 Workflow seguito per la creazione del modello as-is per attività manutentive.   | 88 |
| Figura 6-1 Posizione dei vertici della rete topografica di inquadramento.   | 89 |
| Figura 6-2 Stazionamento con ricevitore GNSS nel vertice "Rotonda" al centro della rotonda del sottopasso Lingotto.   | 90 |
| Figura 6-3 Strumentazione per i rilievi eseguiti con metodi tradizionali (stazione totale Leica TS06plus a sinistra dell'immagine, ricevitore GNSS Leica GS14 al centro e prisma circolare di precisione Leica GPR121 a destra dell'immagine [S21], [S22]). | 90 |
| Figura 6-4 Stazionamento con treppiede e ricevitore GNSS Leica GS14 sul vertice "1000" materializzato a terra con centrino.   | 91 |
| Figura 6-5 Quota ortometrica, altezza ellissoidica e ondulazione del geoide [S23].  | 92 |
| Figura 6-6 Prisma circolare posizionato su treppiede topografico e vincolato ad una rete topografica interna alla galleria.   | 92 |
| Figura 6-7 Esempio di target retroriflettente utilizzato durante i rilievi all'interno del tunnel per la registrazione e colorazione delle scansioni.   | 93 |
| Figura 6-8 Laser Scanner Riegl VZ-400i impiegato durante la fase di acquisizioni con antenna GNSS.  | 93 |
| Figura 6-9 Laser Scanner Riegl VZ-400i con antenna GNSS e camera digitale Nikon D800 montato su un treppiede leggero in carbonio utilizzato come supporto per un flusso di lavoro rapido e fluido nell'acquisizione dei dati.                               | 94 |
| Figura 6-10 Campo visivo (FOV) del Laser Scanner VZ-400i nell'immagine a destra. Nell'immagine a sinistra gli angoli $\vartheta$ e $\varphi$ . [S26].   | 94 |



|   |     |
|---|-----|
| Figura 6-11 Caratteristiche tecniche principali del laser scanner impiegato: estratto da scheda tecnica del Laser Scanner RIEGL VZ®-400i: [S24].  | 95  |
| Figura 6-12 Posizionamento del Laser scanner su treppiede nella semicarreggiata ovest-est (da corso Giambone a Corso Unità d'Italia ScanPos01).   | 96  |
| Figura 6-13 Posizionamento del laser scanner all'interno del sottopasso Lingotto (ScanPos005) inclinato di 30° rispetto all'orizzontale. In alto a destra dell'immagine vedere sulla parete del tunnel un target retroriflettente (T1006).            | 97  |
| Figura 6-14 Schema delle posizioni di scansione e in rosso le point clouds esportate per creare il modello 3D del sottopasso.   | 97  |
| Figura 6-15 Workflow seguito per il processamento dei dati LiDAR.   | 98  |
| Figura 6-16 Esempio generico con i quattro sistemi di coordinate GLCS, PRCS, SOCS e CMCS [S25].   | 100 |
| Figura 6-17 Sistema di coordinate del RIEGL LMS-Z360 Laser scanner Scanner's Own Coordinate System (SOCS) [S27].  | 101 |
| Figura 6-18 Lo schema mostra la trasformazione da diversi sistemi di coordinate SOCS, PRCS, GLCS e viceversa [6.6].   | 101 |
| Figura 6-19 Schema di elaborazione dati LiDAR con software  | 102 |
| Figura 6-20 Vista dell'interfaccia del software RiSCAN PRO: struttura ad albero a sinistra con le 13 ScanPos <sub>00i</sub> caricate e definizione dei sistemi di coordinate di riferimento per i dati in input e in output nel software RiSCAN PRO®. | 103 |
| Figura 6-21 Vista dell'interfaccia del software RiSCAN PRO® e visualizzazione dall'alto delle posizioni di scansione (ScanPos00i) relative al tratto di tunnel del caso studio.   | 104 |
| Figura 6-22 Individuazione dei target retroriflettenti nella ScanPos001 in RiSCAN PRO®.   | 105 |
| Figura 6-23 Esempio di monografia di un target (T1001) utilizzata per l'individuazione dei target nelle varie scansioni.  | 105 |
| Figura 6-24 Visualizzazione della ScanPos002 e posizione dei target riflettenti individuati T1000, T1001, T1007, T1008, T1023, T1024 e T1025 in RiSCAN PRO®.  | 106 |
| Figura 6-25 Finestra di dialogo per la registrazione tra le scansioni.  | 106 |
| Figura 6-26 ScanPos003 e individuazione dei target riflettenti T1009, T1021, T1022, T1023 e T1024 in RiSCAN PRO®.   | 107 |
| Figura 6-27 Tabella dei TPL (SOCS) per la ScanPos003 individuati e con i relativi collegamenti "Corresponding tie-points" con calcolo della deviazione standard in RiSCAN PRO®.   | 107 |
| Figura 6-28 Parte dei dati di scansione all'imbocco ovest del sottopasso nella figura a sinistra e al centro del primo tratto del sottopasso in RiSCAN PRO®.  | 108 |
| Figura 6-29 Ottimizzazione della registrazione delle scansioni con Multi-Station Adjustment (MSA) con i punti controllo e i marker utilizzati in RiSCAN PRO®.   | 108 |
| Figura 6-30 Settaggio dei parametri nella MSA2 legati all'ambiente oggetto di studio e avvio della procedura MSA2 in RiSCAN PRO®.   | 109 |
| Figura 6-31 Procedura MSA2 iterativa in RiSCAN PRO®.  | 109 |
| Figura 6-32 Nuvola di punti georeferenziata e distribuzione spaziale dei punti di scansione per il rilievo LiDAR di dettaglio della parte del tunnel di interesse (inizio imbocco ovest metà della prima canna) in RiSCAN PRO®.                       | 111 |
| Figura 6-33 Nuvola di punti georeferenziata e distribuzione spaziale dei punti di scansione per il rilievo LiDAR di dettaglio della parte del tunnel di interesse (inizio imbocco ovest fino alla rotonda Lingotto) in RiSCAN PRO®.                   | 111 |
| Figura 6-34 Laser scanner RIEGL LMS-Z360 dotato telecamera digitale montata sopra e rappresentazione dei diversi sistemi di coordinate rispettivamente del laser scanner "Scanner's   |     |

|   |     |
|---|-----|
| Own Coordinate System" (SOCS) e della telecamera "Camera Coordinate System" (CMCS) [S25].<br>.....  | 113 |
| Figura 6-35 Matrice 4x4 "Mounting calibration matrix".  | 114 |
| Figura 6-36 ScanPos1 "SCANPOSIMAGES" matrice COP "Camera Orientation and Position Matrix"<br>.....  | 114 |
| Figura 6-37 Individuazione di un tie-point (T0007) in un'immagine all'interno della scartella<br>"SCANPOSIMAGES" relativa alla ScanPos002.  | 115 |
| Figura 6-38 Mounting calibration.   | 115 |
| Figura 6-39 Nuvola di punti georeferenziata e colorata all'imbocco ovest del sottopasso Lingotto.<br>.....  | 116 |
| Figura 6-40 Riduzione delle coordinate durante la fase di importazione della nuvola di punti in<br>Cloud Compare.....   | 117 |
| Figura 6-41 Nuvola di punti in CloudCompare georeferenziata, filtrata e pulita.   | 118 |
| Figura 6-42 Definizione del sistema di coordinate locale nel punto in basso a sinistra dell'imbocco<br>ovest del sottopasso in Autocad e i piani di sezione trasversali utilizzati per ottenere le sezioni<br>trasversali "Extracted Sections" in Cloud Compare (in verde).   | 119 |
| Figura 6-43 Sistema di coordinate globale importato in CloudCompare.  | 119 |
| Figura 6-44 Sezioni Polilinee e "Slice" della point cloud delle sezioni scelte per costruire il modello<br>BIM.   | 120 |
| Figura 6-45 Sezioni trasversali scelte per costruire il modello BIM: in verde le tracce di sezione e in<br>rosa le "slice clouds"   | 121 |
| Figura 7-1 Workflow per importare la nuvola di punti all'interno del software di modellazione Revit<br>.....  | 122 |
| Figura 7-2 Settaggio dei parametri di decimazione e dei sistemi di coordinate in input e in output<br>(UTM84_32N).....  | 122 |
| Figura 7-3 Impostazione dei parametri di filtratura in ReCap Pro.....   | 123 |
| Figura 7-4 Visualizzazione della nuvola di punti in ReCap Pro: vista dall'alto del sottopasso del<br>tratto scelto come caso studio dall'imbocco lato est alla rotonda Lingotto.  | 123 |
| Figura 7-5 Visualizzazione della nuvola di punti in ReCap Pro: vista all'interno del tunnel<br>dall'imbocco est (lato Corso Unità D'Italia).  | 124 |
| Figura 7-6 Visualizzazione della nuvola di punti in ReCap Pro: vista all'interno del tunnel dalla<br>rotatoria all'imbocco est.   | 124 |
| Figura 7-7 Posizionamento automatico a coordinate condivise della nuvola di punti durante la fase<br>di importazione in Revit.  | 125 |
| Figura 7-8 Differenza tra Punto di rilevamento (icona triangolare) in corrispondenza di un<br>caposaldo e Punto base di progetto (icona circolare) in corrispondenza di uno spigolo del<br>manufatto.   | 126 |
| Figura 7-9 Coordinate del punto base di progetto del caso studio.   | 126 |
| Figura 8-1 Workflow seguito per il caso studio.   | 127 |
| Figura 8-2 Esempio di polilinee e slice della nuvola di punti esportate da CloudCompare in Autocad<br>della sezione trasversale alla progressiva y = 10 m dall'origine del sistema locale OXYZ con asse<br>principale del tunnel (colore blu) e traccia del piano di sezione utilizzata in CloudCompare (colore<br>ciano) e griglia (colore rosso scuro) nel piano OXZ..... | 128 |
| Figura 8-3 Sezione trasversale alla progressiva y = 10 m dall'origine del sistema locale con griglia<br>per individuare le coordinate del punto di inserimento in basso a sinistra della sezione.   | 128 |
| Figura 8-4 Coordinate dei punti di inserimento delle 34 sezioni modellate in Revit nel sistema di<br>riferimento locale.....  | 129 |
| Figura 8-5 Sezione alla progressiva y= 1 m dall'origine del sistema di riferimento locale scelto. ..  | 130 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 8-6 Importazioni in Revit della “slice” di nuvola di punti, delle due polilinee esportate da CloudCompare e definizione dei due profili chiusi relativi alla pavimentazione e la calotta e pareti della sezione a progressiva Y=5 m nel sistema di riferimento locale. ....    | 131 |
| Figura 8-7 Modellazione della calotta e delle pareti tramite la creazione di una famiglia parametrica adattiva e assegnazione del materiale: calcestruzzo gettato in opera – C45.....   | 132 |
| Figura 8-8 Esempio di marciapiede sx (6-11_TRIAL2_M_sx.rfa) modellato come famiglia parametrica adattiva e assegnazione del materiale: calcestruzzo gettato in opera – C25.....   | 133 |
| Figura 8-9 Esempio di pavimentazione stradale (6-11_TRIAL2_P.rfa) modellata come famiglia parametrica adattiva e assegnazione del materiale: asfalto pavimentazione grigio scuro. ....  | 133 |
| Figura 8-10 Esempio di famiglia adattiva nidificata di una sezione di 5 m del tunnel (6-11_TRIAL2_PM.rfa). ....   | 134 |
| Figura 8-11 Esempio di nodo “Point.ByCoordinates” in Dynamo per la generazione di un punto dalle sue coordinate cartesiane. A sinistra le porte di input a destra le porte di output. ....  | 135 |
| Figura 8-12 Visualizzazione dell'output di un nodo tramite l'anteprima o tramite apposito nodo "Watch" nel lettore Dynamo di Revit. ....  | 135 |
| Figura 8-13 Estratto dello script utilizzato in Dynamo per la creazione della galleria: prima parte dello script, creazione di punti con una certa distanza e orientati utilizzando un linguaggio di programmazione visuale (VPL) tramite nodi funzionali e collegamenti logici. .... | 136 |
| Figura 8-14 Estratto dello script in Dynamo per la creazione della galleria: seconda parte dello script, gestione delle liste di punti per l’inserimento delle famiglie adattive. ....  | 136 |
| Figura 8-15 Estratto dello script in Dynamo per la creazione della galleria: terza parte dello script, assegnazione delle famiglie adattive nei punti creati.....   | 137 |
| Figura 8-16 Posizionamento in sequenza delle varie famiglie adattive relative alla parte strutturale della galleria in corrispondenza dei punti adattivi in Revit.....  | 137 |
| Figura 8-17 Modello strutturale 3D del tunnel in Revit nel sistema di riferimento globale e coordinate del punto base di progetto.....  | 138 |
| Figura 8-18 Elementi del tunnel modellati. ....   | 138 |
| Figura 8-19 Gerarchia degli elementi in Revit.....  | 140 |
| Figura 8-20 Categorie in Autodesk Revit 2022. ....  | 140 |
| Figura 8-21 Definizione dei parametri geometrici per ogni elemento del tunnel partendo da cataloghi e disegni tecnici del produttore. ....  | 143 |
| Figura 8-22 Creazione del parametro istanza in Revit. ....  | 143 |
| Figura 8-23 Esempio di contenuto informativo in Revit per l’elemento "New Jersey".....  | 144 |
| Figura 8-24 Esempio di collegamento immagine all’interno del contenuto informativo in Revit (foto_13.jpg) del New Jersey. ....  | 146 |
| Figura 8-25 Parametri tecnici inseriti nella famiglia “lampada Galileo 2 EB Tunnel”.....  | 147 |
| Figura 8-26 Parametri relativi ai materiali della lampada Galileo 2 EB Tunnel inseriti nella famiglia. ....   | 148 |
| Figura 8-27 Modellazione della lampada a sinistra, al centro esempio di creazione di un parametro istanza, efficienza apparecchio come rapporto tra due grandezze legato alla disciplina elettrico e raggruppato in fotometrica. ....   | 149 |
| Figura 8-28 Caricamento del file IES nel campo valore del parametro file digramma fotometrico. ....   | 149 |
| Figura 8-29 Definizione della sorgente di illuminazione forma e distribuzione luce. ....  | 150 |
| Figura 8-30 Parametri generali, identificativi e tecnici per il dispositivo di illuminazione.....   | 150 |
| Figura 8-31 Parametri legati alla gestione e manutenzione del dispositivo di illuminazione. ....  | 151 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 8-32 Creazione e compilazione dei parametri per ogni elemento del sottopasso generali e relativi alla manutenzione (inseriti nella scheda “Proprietà modello” non essendo presente in Revit 2022 una specifica). .....  | 151 |
| Figura 8-33 Esempio di modellazione di un segnale verticale (limite di velocità 50 km/h) presente all’interno del tunnel, creazione e compilazione dei parametri.....  | 152 |
| Figura 8-34 Parametri creati in Revit per un segnale stradale. ....  | 153 |
| Figura 8-35 Definizione dei piani di sezione nella vista in pianta. ....   | 154 |
| Figura 8-36 Sezione 1 del modello e della nuvola di punti (a sinistra imbocco lato est del sottopasso Lingotto) per il posizionamento dei vari elementi e creazione dei livelli. ....  | 154 |
| Figura 8-37 Modello in Revit del sottopasso Lingotto con la nuvola di punti da rilievo Laser Scanner.....  | 155 |
| Figura 8-38 Modello in Revit del sottopasso e dei vari elementi. ....  | 155 |
| Figura 8-39 Mapping nome classe IFC per ogni categoria in Revit. ....  | 156 |
| Figura 8-40 Esempio di mappatura delle classi.....   | 156 |
| Figura 8-41 Esportazione secondo gruppi di proprietà di Revit. ....  | 157 |
| Figura 8-42 Configurazione scelta per l’esportazione del modello in formato IFC .....  | 158 |
| Figura 8-43 Estratto del file di testo per la definizione dei Property Sets per l’esportazione in formato aperto IFC del modello in Revit. ....  | 158 |
| Figura 8-44 Versioni IFC Building Smart International (Fonte, <a href="https://www.buildingsmart.org/standards/calls-for-participation/ifcroad/">https://www.buildingsmart.org/standards/calls-for-participation/ifcroad/</a> ).....   | 159 |
| Figura 8-45 Configurazione scelta per l’esportazione in formato IFC Versione 4.0. ....   | 159 |
| Figura 8-46 Dispositivo di illuminazione con i parametri per la manutenzione in Revit e visualizzazione in BIMVision del file IFC esportato. ....  | 160 |
| Figura 8-47 Visualizzazione delle coordinate di un dispositivo di illuminazione in BIMVision del file IFC esportato.....   | 160 |
| Figura 8-48 Visualizzazione dei parametri relativi ad un elemento del tunnel (dispositivo di ritenuta) all’interno di due Bim Viewer gratuiti (Open IFC Viewer e BIMVision). ....  | 161 |
| Figura 8-49 Visualizzazione del segnale di viabilità modificata con i parametri per la manutenzione in BIM VISION secondo i Property Set scelti. ....  | 161 |
| Figura 8-50 HTC Vive .....   | 162 |
| Figura 8-51 Avvio della stanza virtuale all’interno di VREX PRO. ....  | 162 |
| Figura 8-52 Modello IFC importato in realtà virtuale (applicativo VREX PRO) vista del tunnel esterno dall’alto. ....   | 163 |
| Figura 8-53 Visualizzazione del modello IFC importato in realtà virtuale (applicativo VREX PRO) con nuvola di punti georeferenziata dell’imbocco lato est del sottopasso lingotto.....   | 163 |
| Figura 8-54 Visualizzazioni dei vari elementi della galleria e verifica del loro corretto posizionamento e scostamento rispetto alla point cloud (segnale limite di velocità 50 Km/h). ....  | 164 |
| Figura 8-55 Visualizzazione dei quattro raggruppamenti all’interno dei quali sono inseriti i vari parametri nel modello IFC. ....  | 164 |
| Figura 8-56 Selezione di un elemento (lampada AEC Galileo 2 EB Tunnel) in Realtà Virtuale (figura sopra) e determinazione delle coordinate di ogni singolo elemento nel sistema di riferimento UTM – ETRF2000 – WGS84 fuso 32N (esempio lampada AEC Galileo 2 EB Tunnel) tramite applicativo VREX PRO (figura sotto). .... | 165 |
| Figura 8-57 Esempio di elemento del tunnel stradale (segnale di pericolo rotatoria con pannello integrativo) selezionato (sopra) e visualizzazione dei suoi parametri generali (sotto) in ambiente VREX PRO. ....  | 166 |
| Figura 8-58 Visualizzazione in VREX PRO dei vari attributi all’interno del gruppo parametri tecnici per il dispositivo di illuminazione.....   | 166 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 8-59 Visualizzazione in VREX PRO dei vari attributi all'interno del gruppo parametri relativi all'attività di manutenzione per il dispositivo di illuminazione .....              | 167 |
| Figura 8-60 Visualizzazione in VREX PRO dei vari attributi all'interno del gruppo parametri relativi all'attività di manutenzione per la passerella cavi.....                            | 167 |
| Figura 8-61 Misurazioni di distanze in VREX PRO tra i vari elementi (distanza tra i pannelli fonoassorbenti in alto e distanza tra due derivatori dell'impianto di illuminazione). ..... | 168 |
| Figura 8-62 Assegnazione di un'immagine al BCF creato. ....  | 168 |
| Figura 8-63 Titolo e descrizione del BCF creato.....   | 169 |
| Figura 8-64 Visualizzazione del BCF con lo stato, data di creazione e assegnazione. ....   | 169 |

## Acronimi

|            |   |
|------------|---|
| AEC        | Architecture, Engineering and Construction            |
| AECO       | Architecture, Engineering, Construction and Operation |
| AIM        | Asset Information Model                               |
| ANAS       | Azienda Nazionale Autonoma delle Strade               |
| ANAS       | Azienda Nazionale Autonoma delle Strade               |
| BEP        | BIM Execution Plan                                    |
| BIM        | Building Information Modeling                         |
| BIM        | Building Information Modeling                         |
| CAD        | Computer Aided Design                                 |
| CMCS       | Camera Coordinate System                              |
| COP        | Camera's Orientation and Position Matrix              |
| DRF        | Dispositivo per la Ripresa e Resilienza               |
| FM         | Facility Management                                   |
| GIS        | Geographic Information System                         |
| GLCS       | Global Coordinate System                              |
| GNSS       | Global Navigation Satellite System                    |
| GPS        | Global Positioning System                             |
| IAI        | Information Alliance Interoperability                 |
| ICP        | Iterative Closest Point                               |
| IFC        | Industry Foundation Classes                           |
| IFC        | Industry Foundation Classes                           |
| LIDAR      | Light Detection and Ranging                           |
| MDV        | Model View Definition                                 |
| MIMS       | Ministero delle infrastrutture e dei trasporti        |
| MSA        | Multi Station Adjustment 2                            |
| MSOP       | Sensor's Orientation and Position matrix              |
| NGEU       | Next Generation EU                                    |
| OIM        | Organization Information Map                          |
| PIM        | Project Information Model                             |
| PM         | Property Management                                   |
| PNRR       | Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza               |
| PRCS       | Project Coordinate System                             |
| RMSE       | Root Mean Square Error                                |
| RV         | Realtà Virtuale                                       |
| SCANPOS    | ScanPosition o posizione di scansione                 |
| SOCS       | Scanner's Own Coordinate System                       |
| SOP        | Sensor's Orientation and Position                     |
| TLS        | Terrestrial laser scanner                             |
| TPL (GLCS) | Tie Point List - Global Local Coordinate System       |
| TPL (PRCS) | Tie Point List - Project Reference Coordinate System  |
| TPL        | Tie Point List  |
| TPL(SOCS)  | Tie Point List - Scanner's Own Coordinate System      |
| UTM        | Universal Transverse Mercator Projection              |

## Introduzione

La manutenzione delle infrastrutture sta diventando sempre più importante e attuale per il settore delle costruzioni in questo momento storico. Spesso la mancanza di funzionalità di un'opera di una certa rilevanza impatta fortemente sulla vita sociale della comunità; la chiusura completa o parziale è un danno socioeconomico e ambientale che ha un impatto significativo sulla mobilità.

Lo scopo di questa ricerca è quello di dimostrare e testare il valore della metodologia SCAN-TO-BIM, ovvero un workflow operativo che a partire da un rilievo eseguito con Laser Scanner terrestre consente la digitalizzazione di un'opera infrastrutturale per il monitoraggio, l'ispezione e la gestione della manutenzione. Il caso studio scelto per verificare la sua efficienza è il sottopassaggio Lingotto; si tratta di un'infrastruttura strategica per l'area urbana del quartiere Nizza-Millefonti di Torino.

Il presente lavoro di tesi si concentra sulle tecniche di rilievo utilizzate nelle gallerie e sull'applicazione della metodologia BIM alle infrastrutture (InfraBIM) per il Facility Management; in particolare, è stato costruito un modello BIM digitale del primo tratto del sottopasso Lingotto tra via Nizza e la più grande rotatoria interrata e sopraelevata d'Europa. Partendo da una nuvola di punti rilevata mediante Laser scanner terrestre, sono stati modellati prima di tutto gli elementi strutturali (piano stradale, marciapiedi, pietriti e volta della galleria) e costruito il modello strutturale; successivamente sono stati creati e parametrizzati gli elementi di arredo del tunnel (barriere di sicurezza, segnaletica verticale, porte e pannelli fonoassorbenti) e impiantistici (dispositivi di illuminazione, passerelle cavi, chiusini pozzetti, ecc.). Il modello BIM creato vuole essere un contenitore di tutte le informazioni e i dati che riguardano il suo ciclo di vita, in particolare quelle necessarie per sua gestione e manutenzione (O&M). Il modello è stato poi esportato in formato aperto IFC ed importato all'interno del software VREX PRO insieme alla nuvola di punti pulita e georeferenziata per la visualizzazione in Realtà Virtuale (VR). L'obiettivo ultimo del presente lavoro è quello di sviluppare un modello BIM georeferenziato navigabile di un tunnel stradale all'interno del quale visualizzare i vari elementi con i loro parametri e attributi a fini ispettivi e manutentivi. Infine, grazie alla piattaforma in Realtà Virtuale, è possibile accedere al modello da qualsiasi luogo e dispositivo; in questo modo il modello può diventare per gli attori coinvolti uno strumento di collaborazione e di coordinamento degli interventi di manutenzione da svolgere, oltre allo storico delle azioni già effettuate.

Lo scopo della metodologia utilizzata è quello di rendere il processo di digitalizzazione il più generico possibile in modo tale da applicare lo stesso *modus operandi* ad altre infrastrutture lineari. L'approccio seguito può essere utilizzato per qualsiasi altro elemento infrastrutturale lineare.

Questo lavoro di tesi è suddiviso in 9 diversi capitoli. Nel primo capitolo, dopo un breve inquadramento sullo stato delle infrastrutture civili in Italia e la loro manutenzione, vengono espone le norme e le linee guida per gallerie e tunnel stradali. Il secondo capitolo contiene informazioni sul BIM e le sue potenzialità e applicazioni nel monitoraggio e manutenzione delle gallerie. Nel terzo capitolo vengono esaminati concetti teorici relativi agli strumenti e alle tecniche di rilievo laser scanner terrestri. Nel quarto capitolo viene spiegato il processo SCAN-TO-BIM, i vantaggi e i campi di applicazione. Nel quinto capitolo viene introdotto il caso studio scelto e esposti gli obiettivi del lavoro di tesi. Nel sesto capitolo, dopo una breve descrizione delle attività di rilievo svolte, vengono espone le fasi di preelaborazione dei dati grezzi di rilievo ottenuti con tecnica LiDAR terrestre forniti per creare il modello BIM del Sottopasso Lingotto. In particolare, viene spiegato il processo di trattamento e gestione dei dati LiDAR eseguito con due software: RiSCAN PRO, software di gestione del laser scanner terrestre impiegato per l'acquisizione dei dati LiDAR e Cloud Compare. Il primo è stato utilizzato per la registrazione semi-automatica, la georeferenziazione, il sottocampionamento e la colorazione delle singole scansioni mentre il secondo per la pulitura dal rumore, la filtratura e l'unione ottenendo una unica nuvola di punti pulita 3D da cui estrarre sezioni e profili utili alla modellazione del sottopasso.

Nel settimo capitolo viene spiegato come importare la nuvola di punti all'interno del software di modellazione BIM scelto, Autodesk Revit. Nell'ottavo capitolo, la metodologia utilizzata per costruire il modello InfraBIM del sottopasso e per esportarlo in formato aperto di interscambio IFC (Industry Foundation Classes). In aggiunta, vengono mostrate le potenzialità della realtà virtuale all'interno della quale navigare e ispezionare il modello IFC del sottopasso insieme alla nuvola di punti.

Infine, nel nono capitolo vengono espone le conclusioni e presentati gli sviluppi futuri del presente lavoro.



## 1. Stato dell'arte delle infrastrutture civili in Italia e inquadramento normativo sulla loro manutenzione

La Treccani definisce “infrastruttura” quel *complesso di beni capitali che, pur non utilizzati direttamente nel processo produttivo, forniscono una serie di servizi indispensabili per il funzionamento del sistema economico: strade, linee ferroviarie, porti, scuole, ospedali, ecc.* La loro importanza è facilmente dimostrabile dal fatto che nei paesi industrializzati, esse costituiscono il 35-40% del patrimonio complessivo, essendo una delle quattro macroaree del settore delle costruzioni insieme a edilizia, restauro e impianti.

Per una loro corretta classificazione è necessario analizzarne sia la natura funzionale delle diverse strutture all'interno del sistema infrastrutturale nel suo insieme, che le caratteristiche distintive [1]. Tra le varie classificazioni presenti in letteratura, quella più significativa dal punto di vista di digitalizzazione è quella di D. Biehl (1991) che distingue tra:

- Infrastrutture a rete. Rientrano in questa categoria tutti i sistemi presenti in modo diffuso sul territorio e caratterizzati da una serie di punti interconnessi. Questo tipo di infrastruttura ha la necessità di raggiungere vaste zone di territorio o comunque un grande numero di cittadini per essere efficiente. Ne sono un esempio le reti di trasporto stradali e ferroviarie e di comunicazione, alle quali si aggiungono i sistemi di approvvigionamento di energia elettrica, gas e acqua, le vie d'acqua e le opere per la difesa del suolo.
- Infrastrutture puntuali. Per loro natura, questo tipo di infrastrutture sono caratterizzate da un grado relativamente più elevato di immobilità, indivisibilità, non sostituibilità e polivalenza. Ne sono un esempio gli ospedali, le scuole, i musei ma anche l'insieme delle infrastrutture di base (carceri, stazioni di polizia e dell'esercito, tribunali, ecc.) [S1].

Biehl attribuisce alle infrastrutture, inoltre, un ruolo determinante nello sviluppo di una determinata area geografica, misurato in termini di reddito, produttività ed occupazione. «Una regione ben dotata di infrastrutture avrà un vantaggio comparato rispetto ad una meno dotata e questo si tradurrà in un più elevato PIL regionale pro-capite o per persona occupata e/o anche in un più elevato livello di occupazione. Da ciò consegue che la produttività, i redditi e l'occupazione regionale sono funzione crescente della dotazione di infrastrutture.» (Biehl, 1991) [S1]. Secondo Biehl, inoltre, le infrastrutture sono, tra le determinanti lo sviluppo regionale, quelle che maggiormente possono essere oggetto di diretto intervento dei decisori di politica economica. Elemento, quest'ultimo che fa emergere la necessità di quantificazione della reale presenza nel territorio di infrastrutture [S1].

Tra le infrastrutture che supportano direttamente l'attività produttiva, oltre alle reti per la distribuzione e il trasporto dell'energia elettrica e del gas, le reti per la captazione e la distribuzione delle acque, le reti fognarie e le reti di telecomunicazioni (compresa la connettività Internet e l'accesso a banda larga), si inseriscono le infrastrutture di trasporto. Quest'ultime vengono progettate e realizzate per migliorare gli spostamenti di persone e merci e svolgono un ruolo fondamentale nello sviluppo socioeconomico e nella competitività dei territori. È possibile individuare tre tipologie:

- Infrastrutture stradali: includono strade urbane ed extraurbane e autostrade;
- Infrastrutture ferroviarie: includono le reti ferroviarie nazionali, regionali e le reti metropolitane;
- Infrastrutture aeroportuali: includono gli aeroporti e le reti portuali per il trasporto marittimo.

Volendo quantificare le infrastrutture stradali e ferroviarie in Italia, secondo ANSFISA (Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie e delle Infrastrutture Stradali e Autostradali) sono oltre 840.000 km di rete stradale, 60.000 ponti e oltre 2.200 gallerie [S2]. L'Italia è il Paese dell'Unione Europea con il numero più elevato di gallerie stradali e ferroviarie. Inoltre, sono circa 18.900 i km di ferrovie nazionali e regionali con 5443 passaggi a livello, 288 stazioni e 225 km di impianti di trasporto rapido di massa (metropolitane), di cui 131,6 km in galleria [S6].

Pertanto, il patrimonio esistente da gestire è molto vasto; i soggetti, tra gestori delle infrastrutture e imprese esercenti il servizio sono più di 8.000.

Delle 840.000 km di rete stradale, solo poco più di 35.000 km sono strade statali e autostrade, circa il 4%. La maggior parte, intorno all'80%, è in gestione ai Comuni, si contano infatti 7.904 gestori in quest'ambito. Poi ci sono i 123 gestori di strade Provinciali, Regionali e di Città Metropolitane che gestiscono il 16% della rete. Pertanto, più del 96% del patrimonio infrastrutturale stradale nazionale è gestito dagli Enti Locali. Il restante 4% è affidato ai cosiddetti gestori organizzati e di carattere non territoriale quali Anas S.p.A. (Azienda Nazionale Autonoma delle Strade Statali) – Gruppo FS Italiane e Società Concessionarie Autostradali [S2].

| Tipologia di Gestore                     | N° gestori   | Km tratte      | Incidenza percentuale |
|--|--------------|----------------|-----------------------|
| Comuni                                   | 7.904        | 668.687        | 79,64%                |
| Regioni, Provincie e Città Metropolitane | 123          | 135.691        | 16,16%                |
| Strade Statali ANAS S.p.A.               | 1            | 27.259         | 3,25%                 |
| Concessioni Autostradali                 | 27           | 8.006          | 0,95%                 |
| <b>TOTALE</b>                            | <b>8.055</b> | <b>839.643</b> |                       |

Tabella 1-1 Gestori della rete stradale e autostradale, Fonte ANSFISA [S5].

## Km di infrastruttura viaria per tipologia di gestore

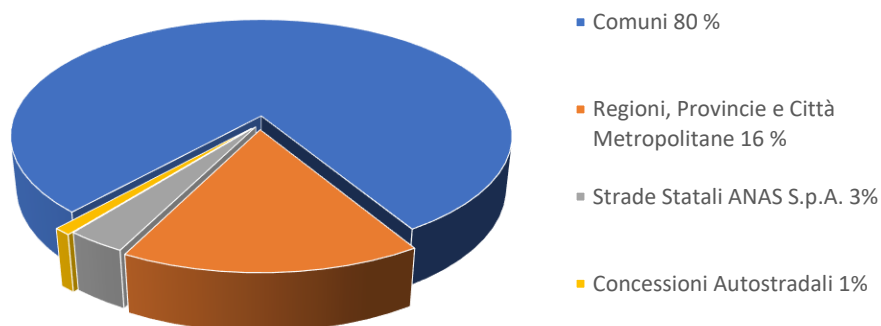


Figura 1-1 Chilometri di infrastruttura viaria in Italia per tipologia di gestore [S5]

Secondo il rapporto del monitoraggio dei ponti dell'Unione delle Province di Italia (Upi) del 27/08/2018, è emerso che le Province delle Regioni a Statuto Ordinario (escluse le Città metropolitane) gestiscono circa 100 mila chilometri di strade su cui insistono almeno 30000 infrastrutture tra ponti, viadotti e gallerie [S3].

La gestione e manutenzione della rete stradale e della rete autostradale non a pedaggio di interesse nazionale è affidata invece ad Anas S.p.A. – Gruppo FS Italiane tramite concessione e relativa

Convenzione con il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti risalente al 2002. Ad oggi Anas S.p.A. cura la manutenzione di più di 32 mila km di strade e autostrade, 18720 ponti e viadotti e 2157 gallerie [S4]. Più di 8.000 km, invece sono dati in gestione alle concessionarie autostradali di cui 4187 km sono della rete TEN – T (Reti di Trasporto Trans-europee) ovvero strade di interesse extra-europeo. Ad oggi sono note in modo esaustivo le condizioni solo del 10% di queste opere [S6]. Da una prima ricognizione condotta dalla Direzione di ANSFISA su circa 800mila chilometri di rete stradale italiana, ovvero quella che fa capo a regioni, province, città metropolitane e comuni i dati sono carenti, limitati e spesso incompleti. La stratificazione normativa, i frequenti passaggi di gestione e la vetustà delle opere rendono attualmente molto difficile avere dati certi sul perimetro della rete e sulle sue caratteristiche. Le ultime rilevazioni utili per il sistema viario comunale risalgono al 1999 e restituiscono una rete di circa 668mila chilometri di strade, mentre più di 135mila chilometri appartengono a province e regioni. Mancano anche le informazioni qualitative, fondamentali per la definizione di moderni Sistemi di Gestione della Sicurezza da parte dei gestori o degli Enti proprietari. L'ANSFISA ha già avviato una prima grande ricognizione chiedendo il coinvolgimento degli enti locali nella rilevazione dei dati per la conoscenza della propria rete di competenza [S6].

Secondo il codice della strada spetta agli enti proprietari la manutenzione, gestione e pulizia delle strade, delle loro pertinenze e arredo, nonché delle attrezzature, impianti e servizi. Inoltre, devono provvedere al controllo tecnico dell'efficienza delle strade e alla apposizione e manutenzione della segnaletica prescritta. In termini generali quindi la responsabilità diretta della sicurezza delle infrastrutture è in capo agli enti gestori che se ne devono occupare a 360° [S2]. L'Agenzia ANSFISA, nata con il decreto Genova all'indomani del crollo del Ponte Morandi e operativa dal 30 novembre 2020, ha incorporato l'ANSF, l'Agenzia per la Sicurezza delle Ferrovie, facendo proprio il know-how sviluppato in ambito ferroviario, anche con l'obiettivo di trasferirlo al settore delle infrastrutture stradali, autostradali e dei trasporti rapidi di massa [S6]. A essa spetta il compito di promuovere e assicurare la vigilanza sulle condizioni di sicurezza delle infrastrutture stradali e autostradali. Questa operazione di coinvolgimento degli Enti Locali che l'Agenzia sta portando avanti, grazie anche al fondamentale contributo che ANCI (Associazione Nazionale Comuni Italiani) e UPI (Unione delle Province di Italia) come aggregatori della rappresentanza del territorio, si inserisce in questo ruolo di sollecito e supporto ad adottare efficaci sistemi di gestione, monitoraggio e controllo. L'obiettivo è quello di accompagnare i gestori, soprattutto quelli più piccoli e con minore disponibilità di risorse tecniche, nelle attività da prevedere e da realizzare, non solo per rispondere alle prescrizioni di legge ma anche per risolvere problematiche complesse e per organizzare Sistemi di Gestione della Sicurezza per la verifica e la manutenzione delle infrastrutture efficaci ed efficienti [S2].

Secondo la relazione sulla sicurezza 2020 dell'Agenzia ANSFISA circa il 90% della rete autostradale ha un Sistema di Gestione; diversi sono i sistemi di certificazione adottati dai gestori autostradali:

- ISO9001 – Sistemi di Gestione per la Qualità.
- ISO 14001 – Certificazione del Sistema di Gestione Ambientale
- ISO/IEC 27001:2013 (ISO 27001) – standard internazionale che descrive le best practice per un ISMS (sistema di gestione della sicurezza delle informazioni, anche detto SGSI, in italiano). Un ISMS è un sistema di processi, documenti, tecnologie e persone che aiutano a gestire, monitorare, controllare e migliorare la sicurezza delle informazioni.
- ISO45001 – Sistemi di gestione per la salute e sicurezza sul lavoro.
- UNI ISO 39001 – Certificazione Sistema di Gestione per la Sicurezza Stradale.  
La norma UNI EN ISO 39001 è lo standard internazionale per la gestione della sicurezza stradale, compresi tutti gli aspetti della gestione del rischio e della conformità legislativa. Con

l'implementazione di un sistema di gestione RTS – Road Traffic Management System certificato ISO 39001, l'organizzazione contribuisce attivamente alla riduzione del rischio di incidenti gravi in relazione al traffico stradale. Un sistema di gestione sicurezza stradale è uno strumento che consente, all'organizzazione che lo ha implementato, la corretta gestione ed il monitoraggio costante di tutte le attività e processi ad esse correlate. Il Sistema di gestione RTS ha come scopo la prevenzione, il controllo, il monitoraggio dei rischi ed il miglioramento continuo delle prestazioni in materia di sicurezza stradale. La norma ISO 39001 è destinata a: società di trasporto pubblico e/o privato, società di manutenzione stradale, società di trasporto e logistica, aziende che fanno uso di mezzi di trasporto aziendali.

- Decreto Legislativo 8 giugno 2001, n. 231 – Disciplina della responsabilità amministrativa delle persone giuridiche, delle società e delle associazioni anche prive di personalità giuridica, a norma dell'articolo 11 della legge 29 settembre 2000, n. 300.
- ISO/IEC 17025 – Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e di taratura.

Gli obiettivi fissati dall'agenzia ANSFISA sono quelli di elevare gli standard di sicurezza del sistema di infrastrutture terrestri, certificare e pianificare gli interventi di manutenzione, oltre a digitalizzare e potenziare i processi di manutenzione e verifica.

*“Molte delle nostre infrastrutture, costruite a partire dal secondo dopoguerra, in alcuni casi raggiungono il fine vita e hanno bisogno di essere smantellate e ricostruite, in molti casi hanno bisogno di manutenzioni straordinarie”* ha dichiarato il precedente Ministro delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili (MIMS) Enrico Giovannini. Inoltre, ha *dichiarato “I prossimi anni, per motivi legati alla vetustà di alcune opere e all'impatto prevedibile dei cambiamenti climatici il nostro Paese dovrà accrescere il proprio sforzo nella direzione della manutenzione ordinaria e straordinaria delle infrastrutture, in un'ottica di prevenzione dei rischi. Non si tratta solo di uno sforzo finanziario, ma di un cambio culturale che vede il ministero e Ansfisa impegnati fianco a fianco, nel rispetto delle rispettive competenze”* [S6].

## 1.1 Manutenzione delle infrastrutture

Le infrastrutture si usurano con il tempo e l'utilizzo e se trascurate si traducono in un degrado del patrimonio con effetti negativi sull'economia, sulla sicurezza degli utenti, sull'efficienza e maggiori costi di ricostruzione nel tempo. L'obiettivo della manutenzione è preservare un bene nel tempo. Le infrastrutture civili (quali strade, ponti, gallerie, ecc.) che costituiscono il sistema di reti per il trasporto delle persone, delle merci e delle facilities come acquedotti, gasdotti, elettrodotti e reti di comunicazione sono state costruite in oltre 70-90 anni. Purtroppo, si tratta di un patrimonio esistente molto vario progettato e realizzato con una attenzione non specifica alla manutenzione. Le principali problematiche sono legate all'elevato numero di fattori variabili quali materiali, dimensioni, epoche costruttive, l'assenza di informazioni dettagliate su molte opere esistenti e la difficoltà nel definire criteri di valutazione e gestione univoci. Inoltre, mancano le risorse, sia economiche che figure professionali, per svolgere rilievi di dettaglio e ispezioni a tutto il parco opere. Gli enti gestori devono mantenere con budget limitati il parco opere in esercizio e farlo in modo efficace senza interrompere il loro funzionamento. Devono anche prestare attenzione in una fase iniziale conoscitiva allo stato attuale delle opere e in una fase successiva programmare ed eseguire gli interventi. La gestione della manutenzione delle infrastrutture viarie deve includere non solo la gestione dell'emergenza e del ripristino, ma soprattutto le attività di gestione del rischio e di valutazione preventiva; l'obiettivo è privilegiare una manutenzione mirata rispetto una manutenzione a tappeto quando non è necessario e dare dei riferimenti guida per orientare i grandissimi investimenti che si stanno facendo oggi per la conoscenza e per la sicurezza. Ciò, può

avvenire grazie al processo di digitalizzazione delle infrastrutture in atto, integrato ad un sistema di monitoraggio che ha un costo sempre più irrisorio rispetto al costo di realizzazione di una nuova opera. Tale sistema di monitoraggio potrà garantire delle misurazioni in tempo reale che una volta analizzate saranno in grado di fornire informazioni utili all'ente gestore.

Tra gli investimenti, il Next Generation EU (NGEU) è un piano di investimenti dell'UE, operativo dal 2021 fino al 2027 e di portata e ambizioni inedite, che l'Unione Europea ha messo in atto con investimenti e riforme per accelerare la transizione ecologica e digitale, migliorare la formazione dei lavoratori e raggiungere una maggiore equità di genere, territoriale e generazionale. L'Italia è la prima Nazione a trarre vantaggio dai due principali strumenti del NGEU: il Dispositivo per la Ripresa e Resilienza (RRF) e il Pacchetto di Assistenza alla Ripresa per la Coesione e i Territori d'Europa (REACT-EU). Il RRF garantisce risorse per 191,5 miliardi di euro da utilizzare dal 2021 al 2026. Per accedere a queste risorse, il governo italiano ha inviato alla Commissione Europea il 30 aprile 2021 il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), che contiene una descrizione dettagliata dei progetti, degli investimenti e delle riforme con i relativi criteri di allocazione e destinazione delle risorse economiche che devono essere completati entro il 2026, in linea con i principi della Next Generation EU, che l'esecutivo dell'Unione Europea ha approvato. A quelle del PNRR si aggiungono altre risorse nazionali del Piano complementare che mirano agli stessi obiettivi della Next Generation EU, ma per un periodo di tempo più lungo. Nel corso della fase di implementazione dei progetti del PNRR, il Ministero è responsabile della gestione generale del Piano e dell'assegnazione delle risorse ai soggetti attuatori, ovvero le Regioni, le Province autonome o gli enti locali, ma anche concessionari, altre autorità o aziende che svolgono un ruolo chiave nella realizzazione degli interventi previsti nel piano, nonché nell'ammodernamento del sistema dei trasporti e delle relative infrastrutture per uno sviluppo sostenibile. Nella figura di seguito (*Figura 1-2*) sono elencati gli impatti degli investimenti del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT) sugli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030:

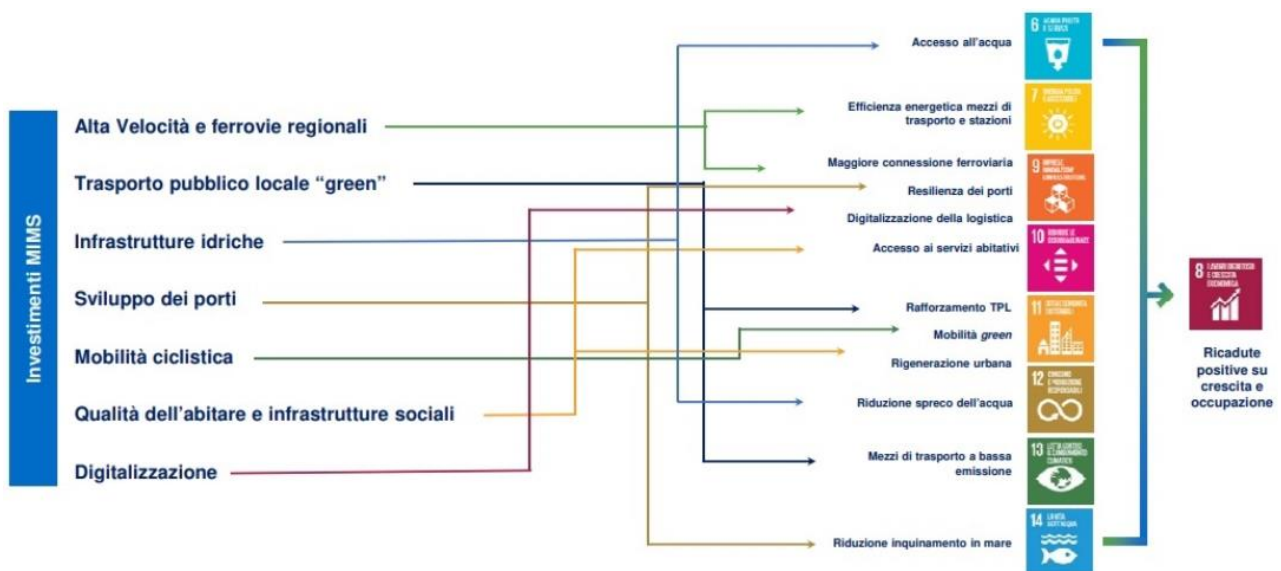


Figura 1-2 Gli impatti degli investimenti del MIT sugli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030 (Fonte: [https://mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/notizia/2021-07/Presentazione%20Allegato%20Infrastrutture%20DEF\\_DEF.pdf](https://mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/notizia/2021-07/Presentazione%20Allegato%20Infrastrutture%20DEF_DEF.pdf))

La necessità di investire conoscenze e risorse nella gestione della manutenzione delle infrastrutture è aumentata negli ultimi anni a causa della consapevolezza dello stato delle infrastrutture e del mutato quadro normativo.

In questo lavoro di tesi, in relazione al caso studio scelto vale a dire un sottopasso stradale, sono state analizzate e studiate le normative e le linee guida legate alle gallerie e sottopassi stradali. Di

seguito vengono riportate le principali normative esistenti e linea guida legate alle gallerie e tunnel stradali.

## 1.2 Linea guida e normativa per la classificazione e la gestione del rischio delle gallerie esistenti

Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici il 23 agosto 2022 ha pubblicato le Linee Guida per la classificazione e la gestione del rischio delle gallerie esistenti. Le Linee Guida sulle gallerie derivano, come per le analoghe Linee guida per i ponti, dal comma 1 dell'articolo 49 del DL 16 luglio 2020, n. 76, convertito, con modificazioni, dalla legge 11 settembre 2020, n. 120, che stabilisce: «Al fine di assicurare l'omogeneità della classificazione e gestione del rischio, della valutazione della sicurezza e del monitoraggio delle gallerie esistenti lungo la rete stradale e autostradale, con decreto del Ministro delle infrastrutture e dei trasporti, sentito il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, adottato entro trenta giorni dalla data di entrata in vigore del presente decreto, sono approvate apposite linee guida in materia di programmazione ed esecuzione delle attività di indagine sullo stato di conservazione delle gallerie esistenti lungo le strade statali o autostrade gestite da Anas S.p.A. o da concessionari autostradali, di esecuzione delle ispezioni e di programmazione degli interventi di manutenzione e di messa in sicurezza delle stesse» [2].

Le Linee Guida hanno carattere complementare alle altre Norme che afferiscono alla sicurezza stradale di cui al DLGS 15 marzo 2011, n° 35 e alla sicurezza antincendio nelle gallerie stradali della rete transeuropea di cui al Decreto Legislativo 5 ottobre 2006, n° 264 e successivi provvedimenti che riportiamo nel seguito. L'obiettivo principale è uniformare la metodologia degli interventi che vengono realizzati e l'impostazione generale degli interventi di manutenzione preventiva, la programmazione e la classificazione. Per la piena adozione di una strategia di manutenzione preventiva è infatti necessario poter procedere a una mappatura – non solo tecnica – delle opere, e per fare ciò è necessario avere a disposizione criteri di classificazione certi. In tal senso è stato istituito dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti con legge n. 130 del 16 novembre 2018 e D.M. n.430 del 8 ottobre 2019 l'AINOP (Archivio Informatico Nazionale delle Opere Pubbliche) con l'obiettivo di censire l'ingente patrimonio delle opere pubbliche di competenza degli Enti e delle Amministrazioni centrali e periferiche dello Stato, delle Regioni, delle autonomie locali, Province Autonome, Province, Città metropolitane, ecc.) e di tutti i Comuni presenti sull'intero territorio nazionale [1].

L'AINOP è suddiviso a seconda della tipologia di opera considerata in 9 sezioni (*Figura 1-3*):

1. Ponti, viadotti e cavalcavia stradali;
2. Ponti, viadotti e cavalcavia ferroviari;
3. Strade;
4. Ferrovie nazionali e regionali – metropolitane;
5. Aeroporti;
6. Dighe e acquedotti;
7. Gallerie ferroviarie e gallerie stradali;
8. Porti e infrastrutture portuali;
9. Edilizia pubblica.



Figura 1-3 Archivio Informativo Nazionale delle Opere Pubbliche (AINOP) (Fonte, [S9])

Ciascuna sezione è articolata in sottosezioni per tipologia di dati quali anagrafica, dati tecnici con analisi storica del contesto e delle evoluzioni storiche, dati economico-finanziari, dati sulla gestione dell'opera anche sotto il profilo della sicurezza, dati legati al monitoraggio tecnico continuo dell'opera attraverso sensori e rilevazione satellitare, allo stato e grado di efficienza dell'opera, alle attività di manutenzioni ordinarie e straordinarie, stato dei lavori, documentazione fotografica, le segnalazioni, ecc. [S9].

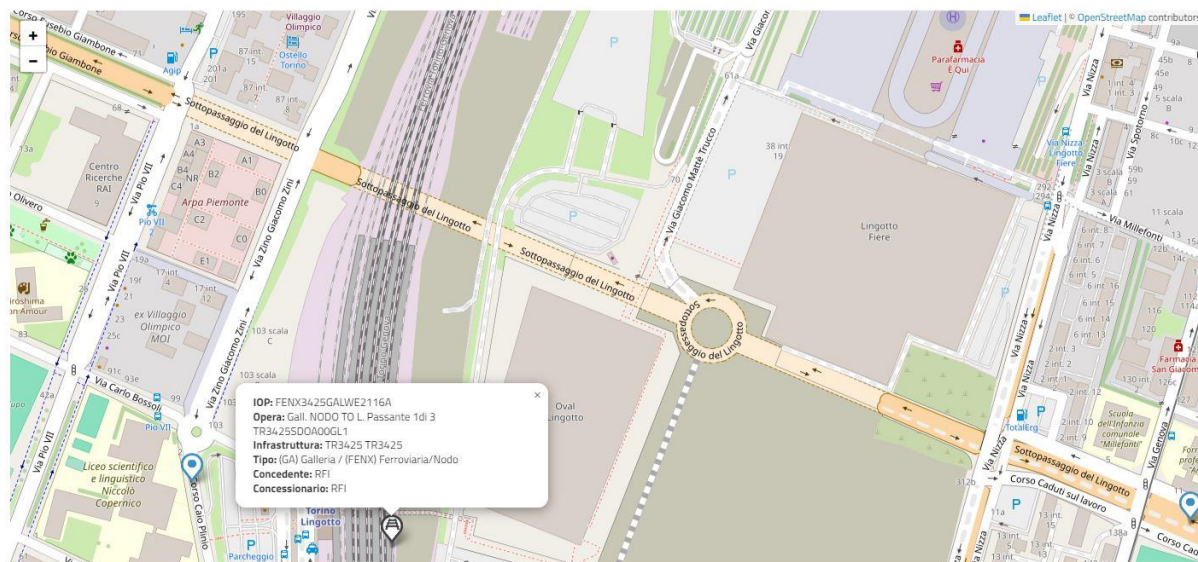


Figura 1-4 Opera infrastrutturale pubblica censita nell'AINOP nell'area del caso studio.

L'AINOP è gestito mediante una piattaforma con la quale sarà possibile identificare un'opera e la sua collocazione nel contesto territoriale (Figura 1-4), ricevere informazioni che consentiranno il monitoraggio tecnico dell'opera, nell'ottica di prevenire criticità, anche attraverso sistemi intelligenti di alert sullo stato della infrastruttura, individuare i possibili flussi di lavoro per rendere efficiente la creazione, manutenzione, gestione e cessazione dell'opera e, inoltre, visualizzare dati, informazioni e documenti dell'opera strutturati in una sorta di "fascicolo dell'opera" virtuale. Quest'ultimo fornisce gli elementi per individuare le opere da porre in sicurezza con interventi ad hoc, classificandole anche in base alle priorità d'urgenza [S9].

Le linee guida grazie ad un approccio multicriterio e multilivello hanno cambiato il paradigma di approccio alla problematica; si parte con i censimenti e le valutazioni speditive-conoscitive fino a definire per ogni opera infrastrutturale una classe di attenzione; questo consente poi di finalizzare ulteriori analisi utilizzando peraltro tecnologie sempre più innovative, come droni, sensori, fibre ottiche fino all' intelligenza artificiale (AI).

Prima delle linee guida i gestori di un'infrastruttura si muovevano secondo la propria sensibilità e le varie normative presenti quali NTC 2018, D.Lgs 30.04.92 n. 285 e s.m.i. Nuovo Codice della Strada, D.P.R. 16.12.92 n. 495 e s.m.i. Regolamento di attuazione del Codice della Strada, D.M. 05.11.2001 n. 6792 e s.m.i. Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade, D.M. 19.04.2006 Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali, D.Lgs 18.04.2016 n. 50 (e s.m.i.) Codice dei contratti pubblici, D.M 02.08.2021 n. 312 Decreto del Ministero delle Infrastrutture Sostenibili, a modifica e integrazione del DM del 01/12/2017, n. 560. Tuttavia, è all'indomani del crollo del ponte di Ariccia, Il 19 luglio 1967 che il ministero dell'ora lavori pubblici emana la prima circolare (circolare n.6736/61A1 del 19 luglio 1967, "Controllo delle condizioni di stabilità delle opere d'arte stradali") in cui richiama tutti i tecnici all'attenzione verso la manutenzione piuttosto che alla gestione dell'emergenza; vengono introdotte le prime regole su tempistiche e modalità di ispezione promuovendo la manutenzione programmata.

Linee guida sulle gallerie esistenti sono finalizzate a pervenire ad uno stato di consapevolezza su quello che è la consistenza delle gallerie stradali in esercizio; ciò si concretizza nell' assegnazione di una classe di attenzione differenziata in funzione di quelle che sono i potenziali rischi di tipo strutturale, locale, globale, idraulico, sismico e stradale; dalla combinazione di questi rischi si arriva ad attribuire a ciascuna galleria una classe di attenzione alta, medio alta, medio bassa e bassa dalla quale poi proseguire con un programma di interventi. Le linee guida hanno come obiettivo principale quello di incrementare il livello di conoscenza delle opere esistenti che sono state costruite alcune anche molti anni fa, e definire delle classi di attenzione che indirizzino verso l'approfondimento e gli studi per una gestione opportuna della manutenzione e di preservare queste opere per le future generazioni. [S7].

Le linee guida si applicano alle gallerie stradali esistenti, intese come opere in sotterraneo in cui una dimensione è prevalente sulle altre due e di lunghezza superiore o uguale a 200 metri per almeno uno dei forni, comprese le gallerie artificiali, le gallerie paramassi e i sottopassi. Per i trafori internazionali che si trovano lungo la rete transeuropea le modalità e l'applicazione delle presenti linee guida sono demandate alle Commissioni intergovernative. Il gestore valuterà caso per caso l'applicazione parziale delle presenti linee guida per opere inferiori a 200 m, in base alle specificità delle singole situazioni e calibrata sulle criticità della singola galleria. Le linee guida si applicano anche a sottopassi per lunghezze inferiori ai 200 metri con riferimento alle problematiche di natura idraulica.

Il problema legato alla sicurezza deve essere gestito a livello territoriale, stabilendo delle priorità di intervento attraverso la valutazione del rischio associato alla singola opera e alla resilienza della rete nella quale è inserita l'opera e occorre avanzare per livelli successivi di analisi e approfondimento per ottimizzare i processi decisionali e concentrare le risorse solo dove necessario. L'approccio multilivello delle Linee Guida è sviluppato su sei livelli diversi, con grado di approfondimento e complessità crescenti.

- Il Livello 0 prevede il censimento di tutte le opere e delle loro caratteristiche principali nonché la raccolta delle informazioni e della documentazione disponibili, anche in relazione a rilievi



e prove già effettuati, con giudizio esperto sul grado delle conoscenze disponibili e individuazione preliminare degli indicatori di pericolosità di maggiore interesse per ciascuna galleria.

- Il Livello 1, che si applica alle opere di Livello 0, prevede ispezioni iniziali della struttura, del rivestimento e di altri elementi di importanza strutturale e non strutturale, nonché delle caratteristiche geomorfologiche, idrogeologiche ed idrauliche dell'area. L'obiettivo del Livello 1 è determinare lo stato di conservazione di ogni opera e le sue principali caratteristiche strutturali e geometriche, nonché potenziali condizioni di rischio associate all'interazione con le formazioni naturali che ospitano la galleria. Le ispezioni iniziali saranno condotte a partire dal quadro di conoscenze già disponibile, che sarà successivamente integrato con specifiche indagini, come ricostruito nell'ambito del Livello 0.
- Il Livello 2 consente di determinare la classe di attenzione di ogni galleria, utilizzando i parametri di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione che sono stati ottenuti elaborando i dati dei livelli precedenti. In base a questa classificazione, si passa ad uno dei livelli successivi. Un indice di diffusione, che indica la percentuale della lunghezza della galleria caratterizzata dalla classe assegnata, è utilizzato per qualificare la classe di attenzione. Inoltre, vengono riportati i caratteri qualificanti i fattori di pericolo che determinano la classe di attenzione sia per la struttura della galleria che per i fattori esterni all'ambiente della galleria, come le classi relative ai rischi geologici geotecnici lungo e agli imbocchi della galleria e al rischio idrologico idraulico.
- Il Livello 3 prevede l'esecuzione di valutazioni preliminari atte a comprendere, unitamente all'analisi della tipologia ed entità dei dissesti rilevati nelle ispezioni eseguite al Livello 1, il livello di sicurezza nei confronti dei possibili dissesti locali che interessano il rivestimento, più o meno diffusi nella galleria, e dei dissesti correlati all'interazione del rivestimento con le formazioni naturali attraversate. Quando ne ricorrano le condizioni, vengono sviluppate valutazioni specifiche per valutare i possibili effetti delle condizioni di salvaguardia idraulica e dell'instabilità di insieme delle formazioni naturali attraversate o in corrispondenza degli imbocchi.
- Il Livello 4 prevede l'esecuzione di valutazioni accurate della sicurezza della galleria nei confronti delle azioni agenti e di fattori esterni all'ambiente galleria in senso stretto, tenendo in debito conto quanto indicato dalle Norme Tecniche per le Costruzioni vigenti.
- Il Livello 5, che non è esplicitamente delineato nelle presenti Linee Guida, si applica alle gallerie considerate significative nella rete. Analisi più approfondite, come quelle di resilienza, valutazione della rilevanza trasportistica, analisi dell'interazione tra la struttura e la rete stradale di appartenenza e le conseguenze di una possibile interruzione dell'esercizio della galleria sul contesto socioeconomico in cui è inserita, sono utili per tali opere.

Dal Livello 0 al Livello 5, le indagini e le analisi diventano più complesse, più dettagliate e più onerose. Tuttavia, il numero di infrastrutture necessarie e l'incertezza dei risultati ottenuti diminuiscono [2].

La *Figura 1-5* mostra il flusso logico che definisce in modo completo le relazioni tra un livello e l'altro e mostra come il Livello 2, ovvero la definizione di una Classe di Attenzione (CdA), sia al centro di tale approccio.

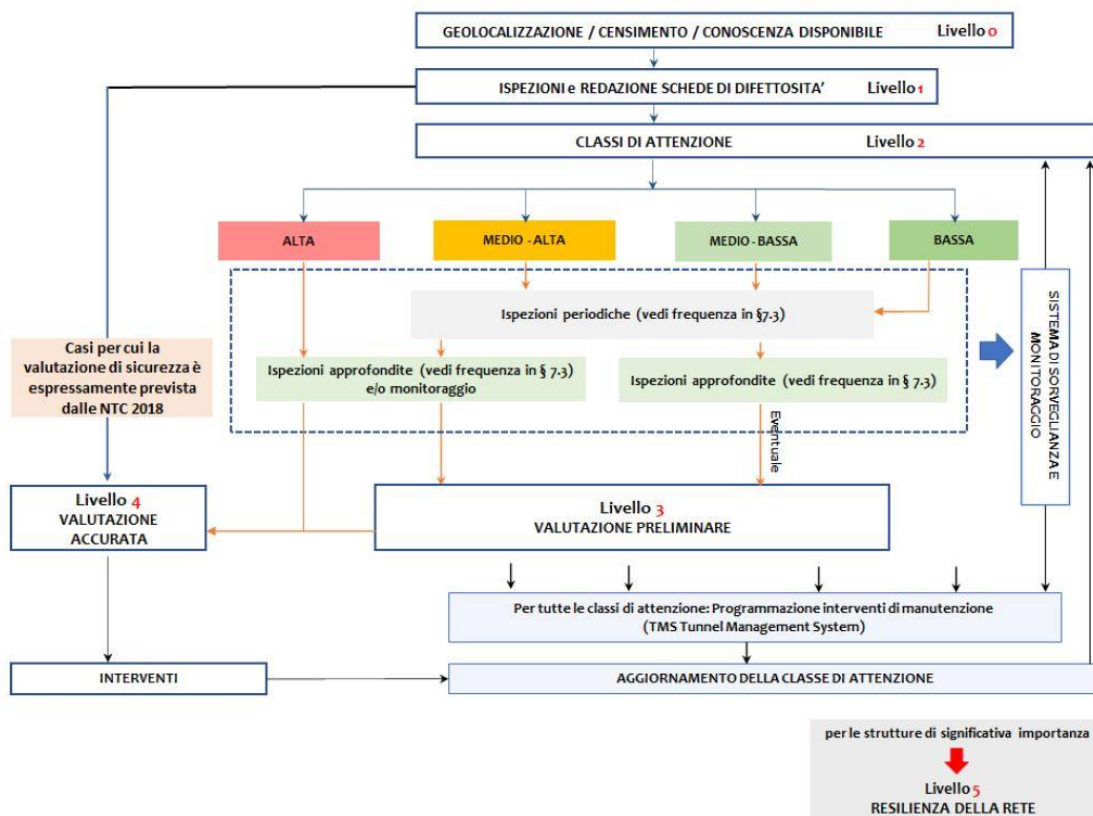


Figura 1-5 Approccio multilivello e relazione tra i livelli di analisi (Fonte: Linea Giuda, 2023)

La Classe di Attenzione (CdA) è funzione dei fattori di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, e viene classificata in alta, medio-alta, medio-bassa e bassa, riferita alla tratta nelle peggiori condizioni e qualificata secondo le specifiche tipologie di potenziale pericolo. Ad ogni Classe di Attenzione corrispondono azioni specifiche che includono indagini, monitoraggio e verifiche, classificate in base all'indice di diffusione ed eventuali caratteri speciali.

Le Classi di Attenzione sono:

- **Alta:** è prevista l'immediata esecuzione di valutazioni approfondite, in termini di sicurezza e di approfondimenti sulle caratteristiche stradali, idrauliche, geologiche, geotecniche e/o strutturali, quando necessario in funzione della Classe di Attenzione e della tipologia di potenziale rischio che ha concorso alla sua attribuzione. Vengono discusse le ipotesi, i criteri e le modalità di esecuzione delle valutazioni accurate previste dal Livello 4 dell'approccio multilivello. È prevista l'esecuzione di ispezioni approfondite nelle gallerie di Classe di Attenzione Alta secondo le modalità e la frequenza, nonché l'eventuale installazione di sistemi di monitoraggio.
- **Medio-Alta:** è prevista l'esecuzione di ispezioni ordinarie e approfondite con l'esecuzione di indagini specialistiche, nonché l'installazione di sistemi di monitoraggio ove necessario. Sulla base delle ispezioni sono previste valutazioni preliminari di Livello 3 e, se necessario, valutazioni approfondite.
- **Medio-Bassa e Bassa:** è prevista l'esecuzione di ispezioni periodiche; inoltre, sono da prevedere ispezioni approfondite ad intervalli regolari, valutando la conferma della Classe di Attenzione e la necessità di avviare valutazioni preliminari della sicurezza. Le ispezioni periodiche ordinarie e indipendenti saranno graduate in base alle frequenze riportate alla Classe di Attenzione attribuita alla singola galleria.

Per tutte le gallerie dopo eventi specifici come urti, incendi, eventi sismici, ecc. sono necessarie ispezioni e, se necessario, si effettuano approfondimenti mediante ispezioni straordinarie con l'esecuzione di specifiche indagini. Il Responsabile della galleria, che lavora nell'ambito dell'organizzazione del gestore, con l'aiuto degli esperti e degli ispettori, deve gestire il programma delle attività per ogni galleria, che va dalla fase di attenzione del Livello 0, all'assegnazione della Classe di attenzione del Livello 2, nonché valutazioni preliminari del Livello 3 e approfondite del Livello 4, con la programmazione dei relativi approfondimenti di indagini e monitoraggi se necessari. Inoltre, il Responsabile della galleria deve predisporre il cronogramma delle attività ispettive da includere in un apposito Documento integrativo del piano di manutenzione della galleria specifica [2].

### 1.3 Gallerie stradali in ambito urbano

La geometria delle gallerie, gli impianti, l'operatività, la manutenzione e la sicurezza sono tutti aspetti legati al loro utilizzo. Il report PIARC 2022 R34EN, ispirato dai precedenti casi di studio e scritto da un gruppo di progettisti, proprietari, operatori e responsabili politici nel campo dei tunnel da tutto il mondo, ("*Good Practices in Maintenance and Traffic Operation of Heavy Trafficked (Urban) Road Tunnels*") affronta i problemi e le buone pratiche, sia tecniche che organizzative, relative alla progettazione, alla manutenzione e al funzionamento, alla gestione del traffico di mezzi pesanti in tunnel stradali urbani, alla gestione degli incidenti e delle comunicazioni. Nel report viene specificato quanto sia importante eseguire una valutazione legata all'importanza del tunnel all'interno della rete, al fine di fornire misure volte a mitigare le conseguenze sulla rete quando, ad esempio, il flusso di traffico nel tunnel deve essere limitato a causa di incidenti o manutenzione. Inoltre, in un'area fortemente antropizzata ad alto traffico, i lavori di risanamento e ripristino delle gallerie devono essere completati mantenendo l'operatività delle infrastrutture in linea con le esigenze di viabilità e sicurezza. D'altronde il proprietario, durante lo studio del progetto preliminare, dovrebbe determinare la fase di questi lavori di manutenzione e le condizioni di intervento tenendo conto dei vincoli operativi raccolti dal gestore e dei risultati degli studi di impatto del traffico [3].

In molti paesi ad elevata densità demografica e infrastrutturale, e di conseguenza ad elevata intensità di traffico, una perturbazione (in particolare la chiusura, anche parziale, di una galleria o di un ponte) ha un impatto significativo sul traffico e sulla vita economica dell'area urbana interessata. Le parole chiave "densità" e "evoluzione" possono essere utilizzate per sintetizzare il contesto dei tunnel stradali urbani:

- densità: le città concentrano la popolazione e le funzioni in aree limitate, creando esigenze di trasporto e sfide da risolvere nelle stesse aree limitate. Ciò comporta un alto livello di traffico su una fitta rete di strade e vie, inclusi i tunnel stradali urbani. La densità delle città va ricercata anche nel sottosuolo: gallerie ferroviarie e sotterranee, sistemi fognari, forniture elettriche e altre reti, ecc;
- evoluzione: le città sono soggette a continui cambiamenti. Crescono in dimensione o densità demografica, spostano funzioni o usi del territorio, riorganizzano le periferie e i centri; per migliorare l'ambiente di vita, vengono create nuove modalità di trasporto, gli edifici più vecchi vengono sostituiti o ampliati, e le strade e le reti stradali si estendono o si riducono. Inoltre, i cambiamenti climatici pongono nuove sfide, come le inondazioni a seguito di precipitazioni estreme o l'innalzamento del livello del mare, e costringono le città a cambiare per essere più sostenibili [3].

Sia le aree urbane che le autostrade sono caratterizzate dalla loro diversità di veicoli: taxi e autobus, veicoli elettrici, motocicli e mezzi pesanti di diverse dimensioni, ecc. Tuttavia, la composizione del traffico spesso differisce: è possibile trovare una percentuale maggiore di autobus e taxi in un'area urbana e meno mezzi pesanti. Questa composizione può avere un impatto sul flusso del traffico (caratterizzato da un movimento stop & go, nonché da un elevato numero di inserimenti e uscite), che può quindi influenzare la velocità e la natura degli incidenti nei tunnel urbani [3].

Occorre inoltre considerare come la maggior parte delle persone che utilizzano i tunnel lo fanno con regolarità e frequenza; ciò si verifica in genere durante i periodi di pendolarismo, ovvero quando le persone si spostano da casa a lavoro. Il volume e la composizione del traffico urbano dipendono da fattori quali l'uso e le funzioni dell'area: ad esempio dove vivono le persone e dove lavorano, e alla disponibilità e attrattività delle modalità di trasporto alternative rispetto ai veicoli privati. Il tracciato di un tunnel, quando si tratta dell'ubicazione dei pozzi di ventilazione o delle strutture tecniche, può essere influenzato da vincoli ambientali o architettonici, come la conservazione degli edifici tutelati. La densità della rete stradale riflette la densità delle città. Per collegarsi alla rete stradale è necessario realizzare incroci o rotatorie in prossimità degli ingressi dei tunnel e collegamenti stradali sotterranei. Il flusso di traffico nel tunnel è direttamente influenzato da questi collegamenti e dalle condizioni del traffico sulla rete principale. La densità del traffico rende necessarie uscite di emergenza legate alla sicurezza degli utenti ed eventualmente la realizzazione di tunnel di fuga separati. La costruzione di un tunnel di servizio può essere uno degli scopi di manutenzione. Queste parti richiedono uno spazio sotterraneo che potrebbe essere difficile da trovare [3].

Un problema comune nei tunnel urbani è l'altezza insufficiente legato alla difficoltà nel gestire un possibile incidente in cui un veicolo troppo alto si introduce in un tunnel scontrandosi con la struttura o danneggiare le attrezzature presenti nella galleria e causare situazioni di pericolo e disagi alla circolazione. Inoltre, viene riportato nel report un altro aspetto fondamentale, ovvero come il miglioramento della qualità della vita e le preoccupazioni per la salute pubblica sono oggetto di legislazione e standard ambientali sempre più rigorosi. Difatti, il rumore, l'inquinamento luminoso, gli effetti visivi e la qualità dell'aria sono le principali fonti di inquinamento e disturbo per gli abitanti dell'area limitrofa e per gli utenti dei tunnel urbani. La qualità dell'aria deve essere presa in considerazione sia all'interno che all'esterno del tunnel. I tunnel non creano ulteriore inquinamento atmosferico, ma lo concentrano nelle zone attorno gli imbocchi e ai pozzi di ventilazione. Ciò potrebbe a sua volta aumentare l'inquinamento di fondo. Parte del rumore dei veicoli che circolano all'interno delle gallerie viene riflesso dal rivestimento della galleria e raggiunge il portale che diventa a sua volta fonte di rumore. In determinate condizioni il livello di rumore in prossimità dell'imbocco di una galleria può essere superiore al livello di rumore di una relativa sezione all'aperto. Il sistema di ventilazione può aumentare questi fastidi. Proteggere le aree residenziali dal rumore e creare un "effetto barriera" contro le strade principali è di fondamentale importanza. Inoltre, l'inquinamento dell'acqua legato alla pulizia delle gallerie stradali che devono essere regolarmente pulite per aumentare la sicurezza stradale e la loro durata; l'acqua di lavaggio contiene sostanze chimiche, metalli pesanti e microinquinanti che devono essere rimossi prima del rilascio nell'ambiente o nel sistema fognario. Infine, il controllo del traffico nei tunnel urbani è fondamentale, soprattutto nei casi di gravi incidenti che richiedono un'evacuazione rapida dei veicoli, che potrebbe essere ostacolata dalla congestione delle uscite. Queste caratteristiche hanno portato sfide nell'ambito del controllo del traffico, della manutenzione, della gestione degli incidenti, della comunicazione, nonché questioni riguardanti la riduzione dei disturbi durante il riammodernamento dei tunnel o la costruzione di nuovi tunnel [3].

## 1.4 Manutenzione delle gallerie stradali

La manutenzione e la gestione dei tunnel stradali urbani ad alto traffico rappresentano una delle sfide, se non la più importante, che devono affrontare gli Enti pubblici e privati, proprietari, gestori e progettisti di tunnel. È necessario adottare un approccio di miglioramento continuo per ottimizzare sia l'efficacia che i costi degli interventi di manutenzione. Questo metodo può essere avviato da subito una volta elaborato un piano di manutenzione e completato prima della messa in servizio. Per raggiungere questo obiettivo, è necessario registrare tutti gli interventi di manutenzione eseguiti, nonché le prestazioni e i guasti delle varie tipologie di apparecchiature. È possibile valutare la qualità della manutenzione utilizzando differenti criteri o distinguere tra le attività svolte internamente e quelle svolte da subappaltatori [3].

Una galleria stradale è dotata di una vasta gamma di attrezzature che possono essere collocate nella zona di traffico oppure nei locali di servizio o in una postazione di controllo-comando. Esposti a carichi variabili (alcuni vengono utilizzati più volte al giorno mentre altri possono restare inutilizzati per diversi anni), necessitano tutti di interventi più o meno frequenti per poter essere affidabili in caso di necessità [3].

Il termine "manutenzione" può avere un significato diverso da un paese all'altro e coprire un significato più o meno ampio. In alcuni paesi, i test e le prove sulle apparecchiature sono considerati parte dell'ambito operativo e non dell'ambito della manutenzione; in altri la revisione completa di un'attrezzatura è un intervento di manutenzione; per altri ancora gli interventi programmati sono compiti operativi [3].

Tuttavia, secondo precedenti report AIPCR, le operazioni di manutenzione possono essere suddivise in due gruppi:

- interventi **preventivi**: vengono eseguiti a intervalli prestabiliti e mirano a preservare l'attrezzatura in buone condizioni operative a breve e lungo termine, nonché a mantenerne la certificazione. La manutenzione preventiva offre il vantaggio di ridurre al massimo i guasti imprevisti e di essere facilmente pianificabile. Può tuttavia portare a livelli di spesa elevati se gli interventi sono troppo frequenti: questo tipo di manutenzione è un processo continuo che viene ottimizzato da squadre di manutenzione qualificate ed esperte;
- interventi **correttivi**: dovrebbero essere minimizzati attraverso un piano di manutenzione preventiva ben pianificato in un'area urbana. Non è pianificabile, quindi a volte richiede interventi di emergenza, che costano molto di più e potrebbero causare problemi al flusso di traffico in galleria [3].

La manutenzione **preventiva** può essere suddivisa in:

- manutenzione **sistematica**: gli interventi vengono effettuati secondo un programma stabilito (ogni settimana, ogni mese, ogni anno o in base ai periodi operativi);
- manutenzione **condizionale**: gli interventi sono subordinati alle misurazioni (misura delle prestazioni, misurazione dell'usura).

Altri fattori particolari che devono essere presi in considerazione sono:

- un alto livello di traffico genererà un alto livello di inquinamento che richiederà una maggiore manutenzione (in alcuni casi sistemi e attrezzature sono sensibili all'inquinamento);

- i periodi durante i quali la struttura può essere totalmente o parzialmente chiusa sono significativamente inferiori a causa dell'alto livello di traffico, che potrebbe rimanere elevato anche durante i periodi notturni ed estivi;
- gli elementi delle attrezzature per tunnel sono molto numerosi e spesso di elevata complessità tecnologica;
- molte persone (le squadre di operatori e/o fornitori di servizi esterni) dovranno lavorare insieme per eseguire la manutenzione.

In linea di principio, l'operatore del tunnel dovrà gestire l'equilibrio tra le azioni di manutenzione preventiva e correttiva; mentre le prime possono essere pianificate e organizzate (disponibilità di squadre e pezzi di ricambio), le seconde no. Un guasto è, per sua natura, imprevedibile: gli addetti alla manutenzione potrebbero non essere disponibili e, talvolta, i pezzi di ricambio necessari non sono disponibili in loco. Un guasto imprevisto comporterà quindi, come minimo, un intervento più lungo o addirittura, in alcuni casi, la necessità di attuare misure compensative per evitare il superamento delle condizioni minime di esercizio [3].

Quando una galleria è molto attrezzata (come nel caso di molte gallerie urbane), si raccomanda di privilegiare una politica di manutenzione preventiva. Tuttavia, una politica di manutenzione preventiva molto articolata non consente di evitare completamente guasti casuali (e quindi interventi di manutenzione correttiva) ma consente di ridurne notevolmente la comparsa. A seconda delle risorse umane e finanziarie disponibili, il gestore dovrà ottimizzare il proprio approccio manutentivo adottando azioni preventive (per limitare guasti casuali), ma non troppo (per limitare il costo degli interventi). Si consiglia pertanto un approccio di manutenzione condizionale che stabilisca la periodicità degli interventi in base alle prestazioni misurate dell'apparecchiatura [3].

Gli interventi di manutenzione ordinaria legati alle infrastrutture autostradali sono in larga parte applicabili anche alle gallerie; tuttavia, le caratteristiche specifiche dei tunnel stradali urbani e delle loro strutture richiedono, in alcuni casi, un'ulteriore considerazione. Spesso, alcune scelte effettuate in fase di progettazione possono facilitare gli interventi di manutenzione da parte del gestore sulle apparecchiature di una galleria urbana. Questi possono includere condizioni di accesso, modalità di installazione e qualità intrinseca delle apparecchiature, possibilità di manutenzione o intervento remoto (sistemi PLC - Programmable Logic Controller, sistema di rete e sistemi video SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition). Le condizioni di accesso sono agevolate se una grande quantità di apparecchiature (armadi elettrici, armadi video, moduli di ingresso/uscita, ecc.) si trovano in locali accessibili dall'esterno anziché essere installati nella zona di traffico. Gli interventi potranno quindi essere effettuati senza dover ridurre la capacità di traffico. Per le apparecchiature che non possono essere installate al di fuori dell'area di traffico, è possibile utilizzare il concetto "plug and play". Ogni dispositivo è collegato al sistema di alimentazione e di controllo tramite collegamenti facilmente accessibili.

In generale, quindi, ogni intervento di manutenzione, al fine di ridurre al minimo il tempo trascorso nel tunnel e l'impatto sul traffico consiste in:

- scollegare l'apparecchiatura da mantenere;
- sostituirlo temporaneamente con un apparecchio identico;
- portarlo in officina per eseguire gli interventi necessari;
- rimetterlo a posto, o lasciare il pezzo sostitutivo al suo posto e utilizzare l'attrezzatura riparata in magazzino in caso di guasto futuro [3].

Anche la qualità delle apparecchiature gioca un ruolo, sia che si tratti della qualità degli involucri (acciaio inossidabile di qualità e spessore adeguati) e/o dei componenti. In entrambi i casi, per una data attrezzatura, le esigenze di manutenzione saranno minori, oppure gli interventi necessari saranno più distanziati, perché l'affidabilità e la disponibilità dell'attrezzatura saranno migliori. Il costo aggiuntivo derivante dall'utilizzo di materiali e apparecchiature di alta qualità deve essere valutato scrupolosamente dal gestore in base ai criteri di costo legati al ciclo di vita o a situazioni specifiche quali strutture con traffico molto intenso o situate su percorsi strategici (quale ad esempio, accesso ad un aeroporto).

Nel report, in aggiunta, vengono definiti gli obiettivi e i principi comuni per raggiungere un adeguato standard di manutenzione per una galleria stradale affinché tutte le parti interessate comprendano e accettino la manutenzione associata a un certo livello di costi e all'indisponibilità del tunnel. L'obiettivo della manutenzione di un tunnel è garantire che i sistemi del tunnel forniscano condizioni di guida sicure per gli utilizzatori mantenendo il tunnel allo standard di sicurezza progettato attraverso una manutenzione regolare; ciò deve essere raggiunto senza inutili riduzioni del capitale investito e senza disagi o indisponibilità. È inoltre necessario sottoporre a manutenzione ogni elemento dell'apparecchiatura presente nel tunnel al fine mantenere la garanzia [3].

Prima di iniziare la manutenzione vera e propria, è necessario assicurarsi che il processo sia adeguatamente pianificato e che le risorse finanziarie, operative (manodopera e tecnici specializzati) e tecniche (ovvero la disponibilità dei pezzi di ricambio) siano sufficienti, in particolare se il produttore non è più in grado di produrre i pezzi di ricambio. Anche il corretto stoccaggio dei pezzi di ricambio è fondamentale [3].

Di conseguenza, un'attività di manutenzione dovrebbe avere la seguente sequenza:

- pianificazione: contenuto, risorse e durata del lavoro;
- gestione delle informazioni;
- coordinamento con le altre autorità;
- piani di emergenza (ad esempio per incidenti durante i lavori di manutenzione);
- decisione della direzione del tunnel e delle altre autorità coinvolte;
- approvazione del piano esecuzione;
- subappalto secondo necessità;
- chiusura del tunnel;
- allestimento del cantiere;
- esecuzione dei lavori di manutenzione;
- approvazione del lavoro eseguito;
- rimozione del cantiere e ispezione di sicurezza;
- ordine di riapertura;
- riapertura del tunnel al traffico normale;
- reporting e registrazione.

Un'operazione di tunnel ben gestita deve avere anche un "Piano di continuità operativa" che definisce le conseguenze del guasto di impianti, apparecchiature e alimentatori critici e le azioni necessarie per garantire la continuità del funzionamento e la sicurezza. Questo piano informerà anche le decisioni relative alla criticità e alla velocità di risposta necessarie per gestire la manutenzione correttiva (riparazione o sostituzione) dopo un guasto operativo delle apparecchiature [3].

Parte di questo piano sono le Condizioni Operative Minime (MOC) che definiscono, in anticipo e con le parti interessate necessarie come i servizi di emergenza e i progettisti, le possibili misure di mitigazione per affrontare un guasto di un'apparecchiatura critica o una perdita di una funzione di sicurezza. Il Piano di continuità operativa andrà oltre i MOC pianificando il più possibile le azioni da intraprendere in caso di chiusura imprevista per lungo tempo. Nonostante tutte le misure possibili per ridurre al minimo le esigenze contrastanti del traffico e dell'accesso per le attività di manutenzione, ci saranno sempre alcuni conflitti residui. L'impatto di questi restanti conflitti deve essere gestito attraverso uno stretto collegamento tra le autorità competenti del traffico e i responsabili della manutenzione dei tunnel. La necessità di accesso per manutenzione e di protezione delle aree di lavoro richiederà normalmente un certo controllo del traffico ed eventualmente chiusure parziali o totali e deviazioni del traffico. È necessario tenere un registro adeguato di tutti gli interventi di manutenzione per garantire che siano sempre disponibili informazioni e specifiche tecniche adeguate e aggiornate. I dati sui guasti specifici dei componenti possono essere estremamente utili per la manutenzione predittiva o la progettazione futura [3].

Le operazioni di manutenzione sono eseguite in modo più efficace se i manutentori sono organizzati e formati. Qualsiasi gestore di galleria necessita di personale dedicato ai compiti di manutenzione e conservazione, sia per eseguire il lavoro stesso sia per garantire che altri lo svolgano correttamente. Se gli appaltatori eseguono i lavori di manutenzione, occorre prestare attenzione a mantenere un livello sufficiente di conoscenza della struttura e delle attrezzature della galleria [3].

Per la manutenzione preventiva degli impianti possono essere adottate diverse soluzioni, avvalendosi del personale proprio del gestore della galleria, o di altre società di servizi che prestano servizi di manutenzione sulla base di un contratto stipulato con il gestore principale. Entrambe le soluzioni possono essere ugualmente adatte, anche se esiste una tendenza crescente all'outsourcing. Molte delle tecniche implicate nella manutenzione delle attrezzature e del tunnel sono molto specialistiche, pertanto, tali operazioni sono spesso subappaltate. In ogni caso, deve essere disponibile una squadra permanente minima (subappaltata o interna) in grado di eseguire un primo intervento di manutenzione su qualsiasi elemento o sistema in caso di emergenza; tale squadra deve disporre di adeguate conoscenze per eseguire parte della manutenzione preventiva o correttiva di primo livello e per effettuare una diagnosi in caso di guasti gravi, risparmiando così molto tempo e denaro nelle riparazioni importanti. In ogni caso, è consigliabile che il personale interno che supervisiona le attività di manutenzione, se non eseguite internamente, debba garantire che i dati relativi alle apparecchiature e alle infrastrutture del tunnel siano aggiornati utilizzando un sistema di manutenzione e gestione ordinaria (RMMS) [3].

Per quanto riguarda gli interventi manutentivi da effettuare nella zona di traffico si possono distinguere i seguenti casi:

- interventi su attrezzature poste lateralmente, effettuabili anche in condizioni di traffico intenso (interventi in giornata con chiusura parziale di una corsia);
- interventi su attrezzature poste lateralmente, effettuabili solo a basso traffico (interventi notturni con chiusura parziale di una corsia);
- interventi su attrezzature poste al di sopra delle corsie di circolazione, effettuabili solo senza traffico (interventi notturni con chiusura di un senso di marcia) (*Figura 1-6*);
- interventi su attrezzature poste al di sopra delle corsie di circolazione, effettuabili solo senza traffico (interventi notturni con chiusura di entrambi i sensi di circolazione o dell'intero tunnel) (*Figura 1-7*) e (*Figura 1-8*).





*Figura 1-6 Interventi di manutenzione di una galleria con chiusura parziale di una corsia.*



*Figura 1-7 Interventi di manutenzione di una galleria con chiusura di entrambi i sensi di circolazione.*

Gli interventi più restrittivi in termini di impatto sul traffico sono quelli che portano ad una chiusura totale o parziale della struttura. Questi interventi devono essere anticipati e pianificati in modo molto preciso. L'organismo di gestione della galleria dovrà ridurre i tempi necessari per chiudere e riaprire la propria struttura per aumentare l'orario di lavoro effettivo. La chiusura totale di una metropolitana o di un tunnel completo può infatti mobilitare molto personale e richiedere tempo. Pertanto, minore è il tempo di chiusura, maggiore è il tempo durante il quale è possibile effettuare la manutenzione.



*Figura 1-8 Interventi di manutenzione della volta di un tunnel stradale con chiusura completa.*

La stessa osservazione si può fare per la riapertura, tenendo presente che sarà necessario anche accertarsi che tutti i partecipanti siano usciti dal tunnel e che le attrezzature siano in condizioni di svolgere il loro ruolo. Si consiglia quindi un'automazione delle azioni di chiusura/apertura. L'organismo di gestione della galleria dovrà inoltre, organizzare il lavoro dei vari partecipanti. La diversità delle attrezzature presenti spesso richiede l'utilizzo di diversi subappaltatori, ciascuno specializzato in un settore particolare. Senza un ottimo coordinamento, queste diverse parti potrebbero essere costrette a interferire tra loro. È fondamentale una gestione molto precisa delle diverse tipologie di interventi realizzati nello stesso periodo [3].

Sia gli utenti abituali che quelli di transito dovrebbero essere informati il più fedelmente possibile (nel tempo e nello spazio) della chiusura di una galleria situata lungo il percorso che stanno utilizzando o utilizzeranno. Queste informazioni potrebbero essere fornite utilizzando la segnaletica esistente (pannelli a messaggio variabile, ecc.) o pubblicando messaggi sui social network, siti web o anche radio o canali televisivi locali.

Oltre agli utenti della rete stradale, la comunicazione potrà essere indirizzata anche a enti locali ed enti pubblici, organizzazioni di trasporto e trasporto merci, organizzazioni di trasporto pubblico di passeggeri e gruppi di operatori taxi, ecc.

Le due principali situazioni di traffico da coprire sono:

- restrizioni pianificate dovute ad azioni relative alla manutenzione preventiva;
- restrizioni non pianificate dovute ad azioni relative alla manutenzione correttiva.

Le mancanze o gli errori durante la fase di progettazione di una galleria ha un impatto molto significativo sul suo funzionamento e sulla sua manutenzione futura. Ciò è ancora più vero per le gallerie stradali urbane per le loro specifiche esigenze di manutenzione e in termini di gestione del traffico.

Altri aspetti da tenere in considerazione a fini manutentivi futuri sono:

- l'integrazione nel contesto urbano richiede di fare i conti con numerosi vincoli, esterni al progetto, sia in fase di costruzione che in fase operativa, derivanti dalla densità e dalla vicinanza delle strutture circostanti;
- la disponibilità è l'obiettivo di qualsiasi nuova struttura considerando che è destinata a risolvere un problema di mobilità e garantire una funzione economica;
- dato il livello di traffico insito in un tunnel urbano, il personale operativo dovrà intervenire frequentemente; quindi, dovrà disporre di condizioni di accesso dedicate per facilitare i propri interventi. Per i servizi di emergenza il problema è ancora più complesso in quanto l'incidente per il quale interverranno creerà, molto spesso, un ingorgo sugli accessi;
- la necessità di far fronte alle evoluzioni future e allo sviluppo delle città attorno al tunnel; ciò deriva dal fatto che un tunnel stradale rappresenta un investimento importante che strutturerà l'ambiente per decenni; deve quindi essere "a prova di futuro" e consentire all'ambiente circostante di evolversi e di svilupparsi (in una certa misura in conformità con i progetti futuri della città) [3].

La progettazione delle gallerie stradali si basa fundamentalmente sul rispetto dei requisiti normativi e/o delle raccomandazioni di ciascun Paese. Tuttavia, la progettazione tiene sempre più conto della manutenzione, sia per ottimizzare i costi operativi futuri sia per aumentare la disponibilità complessiva del tunnel. Per i tunnel stradali urbani ad un alto livello di traffico, viene raccomandato dal report di distinguere tra diversi livelli di manutenzione che vengono poi comunicati alle parti interessate. Una "progettazione basata sulla manutenzione", molto spesso, verrà sviluppata prestando attenzione ai seguenti punti:

- garantire la sicurezza delle attività di manutenzione richiede attrezzature intrinsecamente sicure, buona accessibilità, documentazione dettagliata, formazione regolare, procedure chiare che coinvolgono le parti (squadre operative e di manutenzione, subappaltatori, ecc.);
- la limitazione della necessità di manutenzione straordinaria si ottiene migliorando la tolleranza ai guasti dei diversi sistemi e adottando un approccio funzionale alle condizioni operative;
- la manutenzione può essere concentrata durante le chiusure programmate, con numerosi vantaggi per tutte le parti coinvolte: le squadre di manutenzione e i loro fornitori o appaltatori hanno il tempo di organizzarsi e ottimizzare i loro interventi, gli addetti alla manutenzione non operano in situazioni critiche per la sicurezza e gli utenti della strada sono informati e possono pianificare i loro viaggi;
- la manutenibilità durante il funzionamento è determinata principalmente dalla posizione dell'apparecchiatura e dalla sua accessibilità;
- la riduzione dei tempi di inattività degli impianti dipende in gran parte dalle architetture dei sistemi, dalla disponibilità dei pezzi di ricambio, dall'accessibilità delle apparecchiature, dalla qualità sia della documentazione che della formazione;
- il compromesso per un elevato livello di disponibilità può essere relativamente complesso e può avere un impatto sulla manutenibilità; ancora una volta, la documentazione dettagliata e la formazione regolare fanno parte della risposta, ma il progettista deve cercare il giusto equilibrio.
- facilitare la manutenzione futura (come le riparazioni pesanti) richiede in particolare la riserva di spazi [3].

La normativa italiana, in tal senso, prevede la redazione del Piano di Manutenzione dell'opera e delle sue parti, ovvero un elaborato complementare obbligatorio al progetto esecutivo ai sensi dell'art.38

del DPR 207/2010. Esso, come recita la norma, *“...prevede, pianifica e programma, tenendo conto degli elaborati progettuali, l'attività di manutenzione dell'opera e delle sue parti”* e ha lo scopo di *“...garantire nel tempo il mantenimento della funzionalità e delle caratteristiche di qualità, efficienza ed il valore economico”* dell'opera progettata. Ciò presuppone che vengano individuati i requisiti e le prestazioni del manufatto già in corso di progettazione, requisiti rispetto ai quali andranno *“misurate”* le caratteristiche di qualità ed efficienza in fase di esercizio.

I contenuti del piano di manutenzione sono:

- il manuale d'uso;
- il manuale di manutenzione;
- il programma di manutenzione.

Il manuale d'uso si riferisce all'uso delle parti significative dell'opera, e in particolare degli impianti tecnologici. Il manuale contiene l'insieme delle informazioni atte a permettere all'Ente Gestore di conoscere le modalità per la migliore utilizzazione dell'opera, nonché tutti gli elementi necessari per limitare quanto più possibile i danni derivanti da un'utilizzazione impropria, per consentire di eseguire tutte le operazioni atte alla sua conservazione che non richiedono conoscenze specialistiche e per riconoscere tempestivamente fenomeni di deterioramento anomalo al fine di sollecitare interventi specialistici. Il manuale d'uso contiene informazioni quali la collocazione nell'intervento delle parti menzionate, la rappresentazione grafica, la descrizione e le modalità d'uso corretto.

Il manuale di manutenzione, invece, si riferisce alle parti significative dell'opera e fornisce le indicazioni necessarie per la corretta manutenzione in relazione alle diverse unità tecnologiche, alle caratteristiche dei materiali o dei componenti interessati. Esso contiene le seguenti informazioni:

- la collocazione e la rappresentazione grafica;
- la descrizione delle risorse necessarie per l'intervento manutentivo;
- il livello minimo delle prestazioni;
- le anomalie riscontrabili;
- le manutenzioni eseguibili direttamente dal proprietario;
- le manutenzioni da eseguire a cura di personale specializzato.

Infine, il programma di manutenzione si realizza a cadenze prefissate temporalmente al fine di una corretta gestione del bene e delle sue parti nel corso degli anni. Esso si articola secondo tre sottoprogrammi: il sottoprogramma delle prestazioni, che considera le prestazioni fornite del bene, il sottoprogramma dei controlli che definisce il programma delle verifiche al fine di verificare il livello prestazionale e il sottoprogramma degli interventi di manutenzione che riporta in ordine temporale i differenti interventi di manutenzione.

Se è evidente la volontà del legislatore di porre in rilievo le esigenze manutentive già dalla fase di progettazione, si osserva però che un documento così specifico, redatto in fase di progettazione, risulta di fatto di scarsa utilità in fase di gestione del bene. Anche se la norma richiede che (Cfr. Comma 8) *“il programma di manutenzione, il manuale d'uso e il manuale di manutenzione redatti in fase di progettazione, in considerazione delle scelte effettuate dall'esecutore in sede di realizzazione dei lavori e delle eventuali varianti approvate dal direttore dei lavori, che ne ha verificato validità e rispondenza alle prescrizioni contrattuali, sono sottoposte a cura del direttore dei lavori medesimo al necessario aggiornamento, al fine di rendere disponibili, all'atto della consegna delle opere ultimate, tutte le informazioni necessarie sulle modalità per la relativa manutenzione e gestione di*

*tutte le sue parti, delle attrezzature e degli impianti*”, in realtà un documento così concepito non è di grande utilità in fase di gestione vera e propria del bene.

Di ben altro tenore dal punto di vista dell’approccio al tema della gestione è quello delle UNI EN ISO 19650. Uscita nel marzo 2019, la norma si intitola: *“Organizzazione e digitalizzazione delle informazioni relative all’edilizia e alle opere di ingegneria civile, incluso il Building Information Modelling (BIM) – Gestione Informativa mediante il Building Information Modelling”* che verrà tratta nel capitolo seguente.

Difatti, un approccio BIM utilizzato per creare un Digital Twin (gemello digitale) può essere di grande valore aggiunto per le esigenze di manutenzione, soprattutto se interfacciato con un sistema SCADA e un MMS (sistema computerizzato di gestione della manutenzione) o RMS (sistema di gestione della manutenzione ordinaria) [3]. L’impiego del BIM si sta estendendo sempre più anche nel settore delle infrastrutture civili e queste nuove metodologie di modellazione informativa e parametrica hanno sempre più un impatto sulla gestione manutentiva delle infrastrutture di trasporto e delle sue componenti, oltre che sulla loro progettazione e costruzione. Gli elementi che prima erano semplici oggetti grafici di un’opera infrastrutturale diventano oggetti in grado di contenere parametri, regole e informazioni di varia natura legate non solo al processo costruttivo ma anche alla gestione e manutenzione. Raccogliere i dati all’interno del modello InfraBIM (acronimo utilizzato per indicare metodologie e strumenti BIM applicati alle infrastrutture) e poterli estrarre al bisogno al fine di analizzarli per stimare il decadimento funzionale e prestazionale di un’opera e dei suoi singoli componenti consente di poter pianificare gli interventi manutentivi da attuare [S8].

## 2. BIM per la manutenzione delle infrastrutture

### 2.1 Cos'è il BIM

Il termine “BIM” è l’acronimo di Building Information Modeling ed è stato coniato dal professor Charles M. Eastman alla fine degli anni 70 [4]. Si tratta di una metodologia per la digitalizzazione dei processi di gestione e sviluppo di opere di edilizia e di infrastrutture, che abbraccia l’intero ciclo di vita dell’opera: dalla progettazione, alla realizzazione, alla gestione e manutenzione, fino alla sua demolizione. Il BIM rende disponibile un modello digitale dell’opera costituito non soltanto da una rappresentazione tridimensionale, quanto invece da un database informativo dinamico e sempre aggiornato, interdisciplinare, condiviso e in continua evoluzione, contenente dati relativi ai vari elementi modellati che si intervallano tra definizione della geometria, proprietà dei materiali, caratteristiche e prestazioni progettuali, localizzazione geografica, costi, sicurezza, operazioni di manutenzione fino alla sua dismissione. L’unione di queste due caratteristiche, parte grafica (Building) e parte informativa (Information), costituisce la principale caratteristica della metodologia [5]. La sua funzione, proprio grazie a tutte le informazioni contenute in esso, non si conclude con le fasi di progettazione e realizzazione, ma anzi prosegue durante l’intero ciclo vita del manufatto durante la fase di gestione (Facility management), in cui sono investite le risorse economiche di molto superiori a quelle di costruzione, contribuendo per esempio ad una più efficace e razionale pianificazione delle operazioni di manutenzione.

### 2.2 Origini del BIM

La filiera AECO (Architecture, Engineering, Construction and Operation) ha trovato una prima risposta alle sue esigenze di informatizzazione nell’ausilio digitale alla rappresentazione geometrica: velocizzazione delle tecniche di disegno e di formalizzazione grafico geometrica, offertegli dal CAD (Computer Aided Design) a partire dagli anni ’80 (1981-1985) [6]. Dalla fine degli anni ’90 e soprattutto a partire dagli anni 2000 il settore informatico legato alla filiera AECO ha modificato il suo paradigma introducendo quello che ormai è noto come BIM. La sua teorizzazione risale agli anni ’70 (Eastman, 1974) ma il successo commerciale è arrivato solo dopo il 2002, quando Autodesk ha acquisito e rilanciato Revit, un software di modellazione informativa (software BIM Authoring). Il nuovo paradigma BIM, quindi, introduce la programmazione ad oggetti nei software e passa dal mondo del disegno al computer (rappresentazione) al mondo della simulazione e virtualizzazione informativa.

### 2.3 Evoluzione del BIM e quadro normativo

Con la quarta rivoluzione industriale, nota come industria 4.0, si assume, per la filiera AECO, un’unica finalità strategica comune ad altri settori industriali ovvero l’uso massivo di dati e informazioni in un ambiente di produzione digitalizzato e connesso. Per la filiera AECO, pertanto, la quarta rivoluzione industriale è una rivoluzione di processo (e solo di conseguenza di prodotto); per la qualità di prodotto, risultato finale, non è, quindi, solo importante il prodotto stesso (edificio, infrastruttura) ma il sistema di realizzazione che lo origina ed il sistema di gestione che lo mantiene efficace ed efficiente nel tempo. Una effettiva rivoluzione digitale nella filiera AECO non può dunque riguardare il solo prodotto ma deve interessare, per la prima volta, l’intero processo (di ideazione, sviluppo, progetto, costruzione, gestione-manutenzione e ottimizzazione) ed ogni attore in esso coinvolto (gestori, progettisti, imprese, produttori di componenti, Property manager e Facility manager, ecc.). La digitalizzazione per il settore delle costruzioni è un’opportunità irripetibile di allinearsi ad ogni altro settore dell’industria e dei servizi. Perché questo avvenga, è necessario che la rivoluzione in

atto non si focalizzi sempre e solo sul prodotto finale o, ancora peggio, sui soli suoi prodotti componenti ma coinvolga a pieno titolo ogni processo ed ogni operatore coinvolto. La digitalizzazione rappresenta una innovazione di settore se e solo intrapresa dall'intera filiera delle costruzioni superando il limite del "modello3D" dei software diventando una vera e propria "politica industriale" per tutti gli operatori coinvolti in tutti i processi interessati. L'introduzione del BIM, pertanto, va perseguita e consolidata all'interno di un più ampio spettro della digitalizzazione della filiera AECO.

La diffusione del BIM (come modellazione di oggetti digitali) ha, fondamentalmente, due origini:

- il mondo del software per l'AECO;
- la legislazione di rilancio e controllo delle costruzioni e degli appalti.

Difatti, si tratta di un processo ancora fortemente guidato dai produttori dei software e non dagli operatori economici della filiera. Risponde bene alle esigenze commerciali delle prime non ancora, appieno, alle necessità produttive dei secondi. Inoltre, si tratta di una evoluzione del CAD dove il target di riferimento dei produttori del software BIM restano comunque i progettisti. I software BIM Authoring sono pensati fondamentalmente per la progettazione. A questi si aggiungono le più svariate soluzioni per la gestione dei tempi, dei costi, dell'esercizio ecc., che vanno a tamponare le esigenze della filiera. Il rischio per la filiera AECO è quello di farsi guidare e di non saper governare un processo di innovazione fondamentale per il suo futuro. Sotto il piano della normativa cogente (leggi, decreti, ecc.) la prima spinta verso la digitalizzazione del settore, mediante il BIM e non solo, è arrivata a partire dal 2011 attraverso la strategia di rilancio della filiera delle costruzioni del governo inglese (appalti pubblici governativi sopra 5 milioni di sterline, con obbligo BIM, a partire dal 2016). L'amministrazione inglese si pose il problema di come utilizzare le nuove tecnologie digitali nel settore delle costruzioni, al fine di sfruttare appieno i vantaggi legati a questa rivoluzione digitale costituita dall'ottimizzazione dei processi, delle risorse economiche, delle tempistiche e al contempo dalla limitazione degli errori legati alla cattiva comunicazione degli operatori del processo costruttivo, problemi tipici dei processi tradizionali. Il programma "Digital Built Britain" introdotto nel 2010, e ulteriormente dettagliato poi nel 2011 quando furono introdotti i quattro "livelli di maturità" del BIM ebbe come obiettivo il raggiungimento del livello 2 nel 2016, grazie all'obbligo di legge di utilizzo del BIM nelle fasi di progettazione e costruzione di qualsiasi progetto pubblico e nelle grandi opere infrastrutturali.

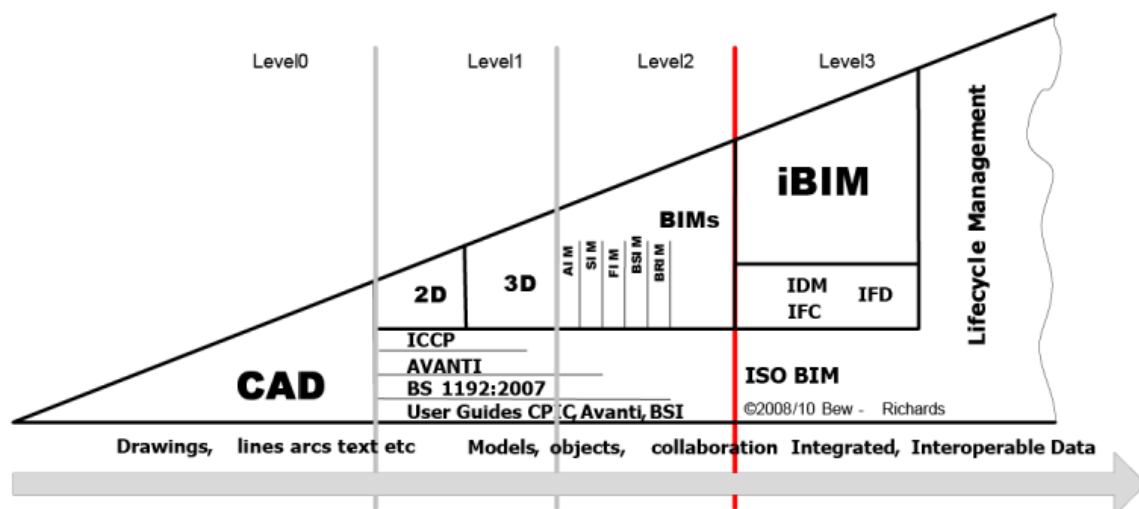


Figura 2-1 Triangolo di Bew: livelli di maturità digitale del BIM (Fonte, <https://biblus.acca.it/livelli-di-maturita-bim/>).

Seguirono l'introduzione del BIM nella Direttiva Appalti comunitaria (Direttiva 2014/24/UE), ed il conseguente suo richiamo in ognuno dei Codice dei Contratti degli Stati membri. Per l'Italia il D.Lgs. n.50/2016, e poi l'introduzione dell'obbligo a partire dal primo Decreto Baratonò (D.M. n.560/2017) fino al nuovo Codice degli Appalti D. Lgs. n. 36 del 31 marzo 2023.

### 2.3.1 Contesto Normativo

La digitalizzazione della filiera è un ambito molto normato e gli standard vigenti in termini di BIM, sicurezza e scambio delle informazioni si muovono su tre livelli:

- Standard ISO: norme di carattere internazionale, hanno riferimento in tutto il mondo e applicazione negli Stati membri che li adottano (ISO 19650).
- Standard EN: di carattere "europeo", hanno riferimento nei paesi della comunità europea, più alcuni altri, e applicazione diretta negli Stati membri.
- Standard Nazionali: di carattere "locale", esempio UNI, hanno riferimento nel solo paese normatore che li pubblica (ad esempio UNI11337 in Italia e BS/PAS 1192 in UK).

#### 2.3.1.1 UNI EN ISO 19650

Dal 2017 lo standard di riferimento a livello internazionale è rappresentato dalla famiglia della ISO 19650 in tutte le sue parti (ad oggi 6). La sua struttura segue molto la famiglia delle BS PAS 1192 di UK, prassi di riferimento che BSI (British Standards Institution) ha pubblicato a partire dal 2013 e sta oggi man mano ritirando in favore delle nuove ISO 19650. La prima fondamentale rivoluzione introdotta dalla ISO 19650 riguarda l'approccio al processo di produzione e gestione della filiera AECO. Il progetto è sempre stato considerato come al centro del sistema delle costruzioni. Con la ISO 19650 viene posta al vertice la gestione che diviene "gestione degli Asset", dalla quale derivano le esigenze che originano il progetto (di nuova costruzione, recupero, ricostruzione) cui corrisponde l'esecuzione di differenti attività (produzione, costruzione, installazione, demolizione).

Il flusso informativo nella ISO 19650 è organizzato attraverso un sistema di:

- "domanda": Quadro esigenziale Informativo, "Information Requirements";
- "risposta o consegna/delivery": Modello Informativo, "Information Models";
- Organization, Asset, Project Information Requirement: OIR, AIR, PIR
- Asset, Project Information Model: AIM, PIM

I requisiti informativi interni nel caso di outsourcing, per ogni specifica commessa fanno da base informativa necessaria a definire i requisiti di ingaggio, "scambio informativo": Exchange Information Requirement (EIR) o Capitolato Informativo (UNI 11337).

All'EIR messo a base di gare dall'azienda richiedente un servizio, od un lavoro od una fornitura, il soggetto da ingaggiare risponde con un piano di esecuzione BIM: BIM Execution Plan (BEP); piano di Gestione Informativa BEP (pGI). In vero, prima con una "offerta di gestione Informativa" (BEP (oGI); preBEP) e poi con il vero e proprio piano (BEP (pGI); postBEP).

Lo scambio informativo riveste un ruolo fondamentale in un settore della filiera così lunga e dove il ricorso alla esternalizzazione rappresenta la normalità. Non essendoci nel settore uno o pochi grandi operatori in grado di imporre un proprio standard informativo, l'uso di linguaggi aperti non proprietari è sempre stata una esigenza vitale per la filiera. In tutto il mondo e dalle maggiori committenze o Stazioni Appaltanti (SA), lo schema IFC (*Industry Foundation Classes*), di cui allo standard ISO 16739, è stato accettato come modello di dati (con classi e relazioni) ed un formato di interscambio (attraverso viste di *Model View Definition* o MDV).



In particolare, il formato IFC costituisce una base per la definizione di un dominio condiviso di settore ed un sistema standardizzato di interscambio informativo secondo le specifiche viste MDV. La “vista” definita, consente di trasferire attributi di un modello proprietario in un modello aperto secondo regole prefissate. Le MDV sono differenti per uso del modello e per versione di IFC (2x3, 4 o 4.3), pertanto un modello IFC esportato per finalità di controllo e coordinamento (tipicamente per la Clash Detection) è diverso da un modello IFC esportato per finalità di gestione (Facility management, FM). I file IFC hanno una funzione di trasferimento dati, per operazioni di controllo, e di formalizzazione delle attività, per il deposito. Il file IFC è un file tendenzialmente statico (non è parametrico) che, da un lato, permette alle varie discipline di cooperare fra loro pur operando con differenti linguaggi nativi più appropriati per le rispettive specificità e, dall’altro, consente di fissare il modello dati ad un determinato momento nel flusso di processo, con garanzia di un suo utilizzo e riapertura nel tempo.

### 2.3.1.2 Il livello di fabbisogno informativo EN 17412

Uno degli aspetti più importanti in una qualsiasi attività e conseguentemente anche nella produzione di informazioni è definire la misurabilità dei risultati. Anche per la filiera AECO, si è pertanto cercato di identificare un insieme idoneo a misurare la completezza dei modelli dati rispetto ai requisiti richiesti. Il sistema informativo introdotto dalla ISO 19650 abbiamo visto essere caratterizzato dalla definizione dei requisiti necessari a vari livelli (OIR, AIR, PIR, EIR) che devono trovare risposta nei modelli dati conseguenti (AIM, PIM, BEP e oggetti digitali che li costituiscono). La misurazione della rispondenza e completezza delle risposte, modelli e oggetti, è stato dapprima ipotizzato attraverso la definizione di differenti Livelli Informativi, noti come LOD (Level of development – USA e Level of Definition - UK). A loro volta suddivisi in livello di completezza dell’informazione grafica e alfanumerica (LODetail e LOInformation). Si sono, pertanto, generati nel mondo differenti metodi di misura delle informazioni (digitali); in particolare quello Statunitense, quello Britannico ed uno specifico per l’Italia nato dalla somma dei primi due (UNI 11337).

Con l’introduzione delle ISO 19650 questo schema si è in parte modificato introducendo il concetto di *Livello di Fabbisogno Informativo* (LoIN, *Level of Information Need*). Il LoIN non definisce più delle scale predefinite, ponendo in capo al soggetto proponente l’onere di definire i requisiti necessari di volta in volta in relazione alla commessa (progettazione esecutiva, costruzione, installazione, ecc.) ma anche al modello (architettonico, strutturale, ecc.). Da questi requisiti si potranno, quindi, definire gli attributi necessari a comporre ogni singolo oggetto, come ad esempio: quanti attributi, quali attributi, ecc., suddivisi in informazioni geometriche, alfanumeriche e documenti. Il tutto è stato formalizzato nella norma europea EN 17412, parte 1, che applica i principi della ISO 19650.

### 2.3.1.3 UNI 11337

Lo standard italiano sulla digitalizzazione del settore delle costruzioni nasce nel 2009 con la norma UNI 11337 parte 1: Edilizia e opere di ingegneria civile, *Criteri di classificazione di opere e prodotti da costruzione, attività e risorse*, Identificazione, descrizione e interoperabilità. Erano previste anche una parte 2 (mai pubblicata) ed una parte 3 che venne pubblicata solo nel 2015, sulla definizione degli attributi digitali dei prodotti da costruzione (schede tecniche digitali di prodotto). Di seguito all’uscita delle PAS UK, dal 2014/15, si decise di rivedere quella struttura nella odierna UNI 11337:2017 – Edilizia e infrastrutture, Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni (BIM) costituito da 12 parti delle quali solo 1, 3, 4, 5, 6 e 7 sono state pubblicate le altre sono in itinere. La seguente norma, non cogente, definisce le linee guida da seguire nell’adozione della metodologia BIM e, costituisce il recepimento, in lingua italiana, della norma europea EN ISO 19650-1 (edizione dicembre 2018), che assume così lo status di norma nazionale italiana. Uno degli sviluppi

più importanti della UNI 11337, è riferito proprio alla struttura dei requisiti (Requirement: OIR, AIR, PIR, EIR) e dei modelli (AIM, PIM).

#### 2.3.1.4 DM 560/2017 (Decreto BIM)

Il Decreto italiano 560/2017, attuativo dell'art. 23 comma 13 del D.Lgs. 50/2016 (Codice degli Appalti Pubblici), anche noto come "Decreto BIM" o "decreto Baratonò", è stata la norma di riferimento a livello nazionale che specificava le modalità e le tempistiche di progressiva introduzione, da parte delle SA, del BIM e della graduale obbligatorietà di adozione dei metodi e strumenti elettronici di modellazione dell'edilizia e delle infrastrutture nelle fasi di progettazione, costruzione e gestione delle opere e relative verifiche secondo la seguente tempistica:

- Dal 1° gennaio 2019 per i lavori complessi relativi a opere di importo a base di gara pari o superiore a 100 milioni di euro;
- dal 1° gennaio 2020 per i lavori complessi relativi a opere di importo a base di gara pari o superiore a 50 milioni di euro;
- dal 1° gennaio 2021 per i lavori complessi relativi a opere di importo a base di gara pari o superiore a 15 milioni di euro;
- dal 1° gennaio 2022 per le opere di importo a base di gara pari o superiore alla soglia di cui all'art.35 del Codice dei contratti pubblici;
- dal 1° gennaio 2023 per i lavori complessi relativi a opere di importo a base di gara pari o superiore a 1 milione di euro;
- dal 1° gennaio 2025 per i lavori complessi relativi a opere di importo a base di gara inferiore a 1 milione di euro.

#### 2.3.1.5 Codice degli Appalti D. Lgs. n. 36 del 31 marzo 2023

Dal 1° luglio 2023, data di entrata in vigore del nuovo Codice dei Contratti Pubblici (D.Lgs. n. 36/2023), l'uso del BIM in Italia è diventato obbligatorio (art. 43 c. 1):

- per tutte le opere di nuova costruzione e interventi su costruzioni esistenti per importo a base di gara superiore a 1 milione di euro a partire dal 1° gennaio 2025;
- per tutti gli interventi di ordinaria e straordinaria manutenzione qualora inerenti ad opere precedentemente eseguite con l'uso del BIM.

Il codice dei contratti pubblici si compone di 229 articoli suddivisi in 5 libri e 38 allegati.

Gli obiettivi del nuovo codice appalti sono (Libro I parte II artt. 19 a 36):

- digitalizzare i contratti pubblici per migliorare l'efficienza e l'efficacia delle procedure di appalto;
- dare maggiore trasparenza, tracciabilità e controllo, contribuendo a prevenire la corruzione e garantire il rispetto della legge.

Difatti, il Decreto Legislativo 36/2023 è un ampliamento applicativo del BIM per la gestione informativa e digitalizzata delle opere nel corso del ciclo di vita con nuovi riferimenti alle fasi di verifica della progettazione, direzione lavori e collaudo e con lo scopo di rafforzare la certezza ed l'effettività nell'utilizzo della metodologia, caratterizzata dall'innegabile valore strategico, attraverso

l'individuazione di un unico termine (obbligo BIM posticipato al 1° gennaio 2025 – importo superiore a 1 Milione di €).

L'Allegato I.9 del D.lgs. n. 36/2023 *Metodi e strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni* ingloba e dettaglia quanto già anticipato dal precedente "Decreto BIM":

- formazione del personale;
- uniformità dei metodi;
- attuazione dei processi;
- scambio e interoperabilità;
- specifiche tecniche;
- capitolato informativo.

Di seguito gli articoli dell'allegato I.9 in sintesi:

- Art. 1, c.2 lettera a) Piano di formazione del personale;
- Art. 1, c.2 lettera b) Piano di acquisizione Hardware & Software;
- Art. 1, c. 2 lettera c) Atto organizzativo;
- Art. 1 c. 3 Nomina CDE Manager, BIM Manager e BIM Coordinator.
- Art. 1, commi 4 e 5 Dotazione ACDat e adozione formati interoperabili;
- Art. 1, commi 6, 7, 8 e 9 Conformità alle norme ISO, EN e UNI, Capitolato Informativo e standard organizzativi;
- Art. 1, comma 10 Regole per lo svolgimento degli affidamenti di servizi e lavori;
- Art. 1, comma 11 Direzione lavori, collaudo e verifica di conformità;
- Art. 1, comma 12 Punteggi premiali.

Nel dettaglio, l'allegato definisce *le modalità e i termini di adozione dei metodi e strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni da utilizzare, in relazione a ogni singolo procedimento tecnico-amministrativo all'interno della stazione appaltante, per l'affidamento e l'esecuzione dei contratti pubblici di lavori, servizi e forniture e volti alla manutenzione e alla gestione dell'intero ciclo di vita del cespite immobiliare o infrastrutturale, fino alla sua dismissione. (Art. 1 c. 1 Allegato 1.9 D. Lgs. 36/2023).*

*Le stazioni appaltanti, prima di adottare i processi relativi alla gestione informativa digitale delle costruzioni per i singoli procedimenti, indipendentemente dalla fase progettuale e dal relativo valore delle opere, provvedono necessariamente a:*

*a) definire e attuare un piano di formazione specifica del personale, secondo i diversi ruoli ricoperti, con particolare riferimento ai metodi e agli strumenti digitali di modellazione, anche per assicurare che quello preposto ad attività amministrative e tecniche consegua adeguata formazione e requisiti di professionalità ed esperienza in riferimento altresì ai profili di responsabili della gestione informativa di cui al comma 3;*

*b) definire e attuare un piano di acquisizione e di manutenzione degli strumenti hardware e software di gestione digitale dei processi decisionali e informativi;*

*c) redigere e adottare un atto di organizzazione per la formale e analitica esplicitazione delle procedure di controllo e gestione volte a digitalizzare il sistema organizzativo dei processi relativi all'affidamento e alla esecuzione dei contratti pubblici, oltre che per la gestione del ciclo di vita dei beni disponibili e indisponibili. Tale atto di organizzazione è integrato con gli eventuali sistemi di gestione e di qualità della stazione appaltante. Le stazioni appaltanti che adottano i metodi e gli*

*strumenti di cui al comma 1 nominano un gestore dell'ambiente di condivisione dei dati e almeno un gestore dei processi digitali supportati da modelli informativi. Tali stazioni appaltanti inoltre nominano per ogni intervento un coordinatore dei flussi informativi all'interno della struttura di supporto al responsabile unico di cui all'articolo 15 del codice. Tali gestori e coordinatori devono conseguire adeguata competenza anche mediante la frequenza, con profitto, di appositi corsi di formazione. (Art. 1 c. 3 Allegato 1.9 D. Lgs. 36/2023). Le stazioni appaltanti adottano un proprio ambiente di condivisione dati, definendone caratteristiche e prestazioni, la proprietà dei dati e le modalità per la loro elaborazione, condivisione e gestione nel corso dell'affidamento e della esecuzione dei contratti pubblici, nel rispetto della disciplina del diritto d'autore, della proprietà intellettuale e della riservatezza. I dati e le informazioni per i quali non ricorrono specifiche esigenze di riservatezza ovvero di sicurezza sono resi interoperabili con le banche dati della pubblica amministrazione ai fini del monitoraggio, del controllo e della rendicontazione degli investimenti previsti dal programma triennale dei lavori pubblici e dal programma triennale degli acquisti di beni e servizi. (Art. 1 c. 4 Allegato 1.9 D. Lgs. 36/2023). Le stazioni appaltanti utilizzano piattaforme interoperabili mediante formati aperti non proprietari. Le informazioni prodotte sono gestite tramite flussi informativi digitalizzati all'interno di un ambiente di condivisione dei dati e sono condivise tra tutti i partecipanti al progetto, alla costruzione e alla gestione dell'intervento. (Art. 1 c. 5 Allegato 1.9 D. Lgs. 36/2023).*

## 2.4 Potenzialità del BIM

Il modello BIM sta diventando sempre più importante nei settori dell'ingegneria civile e delle infrastrutture perché migliora la qualità dei progetti, la sostenibilità e le prestazioni delle risorse e riduce i rischi. Inoltre, aiuta a migliorare il processo decisionale, il controllo dei costi e la gestione a lungo termine delle risorse infrastrutturali critiche.

Il modello BIM, infatti, è una rappresentazione digitale di un'opera che consente:

- integrazione dei dati: i modelli BIM consentono un migliore coordinamento tecnico e informativo grazie all'uso di un unico database digitale in cui sono raccolti tutti i dati eterogenei sul progetto, tra cui informazioni geometriche, materiali, caratteristiche strutturali, dati economici, programmi dei lavori, specifiche di capitolato, schede tecniche etc. a supporto di un processo decisionale informato durante tutto il ciclo di vita del progetto;
- collaborazione: favorisce una migliore comunicazione e coordinamento tra gruppi di lavoro multidisciplinari, quali architetti, ingegneri, appaltatori e parti interessate come enti gestori e imprese coinvolte nell'attività di gestione e manutenzione dell'asset;
- analisi e simulazione: grazie a strumenti di visualizzazione e interrogazione consente varie analisi e simulazioni, come analisi strutturali, simulazioni del flusso di traffico e valutazioni di impatto ambientale;
- efficienza e risparmio dei costi: può portare a una maggiore efficienza del progetto, alla riduzione degli errori, a una migliore gestione dei rischi e al risparmio sui costi durante la vita dell'asset;
- la manutenzione: contengono informazioni per le operazioni e la manutenzione in corso, inclusi programmi di riparazione, istruzioni di manutenzione e specifiche delle apparecchiature;
- gestione del ciclo di vita: utilizzata non solo durante le fasi di progettazione e costruzione ma anche durante l'intero ciclo di vita dell'asset infrastrutturale supportando la gestione delle

risorse, verifiche e aggiornamenti durante l'attività di manutenzione fino alla demolizione (Figura 2-2).



Figura 2-2 Ciclo di vita di un'opera (Fonte, <https://www.innexhub.it/building-information-modeling/>).

Il BIM permette di associare ad un oggetto informazioni alfanumeriche (parametri) utili a:

- identificazione (es. dimensioni, nome produttore, provenienza, ecc.);
- gestione e manutenzione (es. quante volte pulirlo, oliarlo, sostituire elementi critici, ecc.);
- dismissione (es. percentuale di materiali riciclabile, società di riciclo, ecc.).

L'implementazione del BIM permette, quindi, di fornire in formato digitale, interoperabile e aggiornabile anche in tempo reale, per ogni commessa e per ogni oggetto del costruito, informazioni e dati relativi a:

- geometrie e misurazioni (3D);
- tempistiche di realizzazione (4D);
- budget e costi unitari (5D);
- gestione dell'esercizio e della manutenzione (6D);
- valutazione dei consumi e sostenibilità ambientale (7D);

Inoltre, in riferimento alle tre nuove dimensioni del BIM (Figura 2-3), vengono forniti dati legati a:

- salute e sicurezza (8D);
- costruzione snella (9D);
- industrializzazione delle costruzioni (10D).



Figura 2-3 Le dimensioni del BIM, Fonte <https://biblus.acca.it/le-dimensioni-del-bim/>.

L'uso di un modello informativo BIM consente nella fase realizzativa ai vari attori coinvolti nel progetto (proprietario, progettista, direttore lavori, impresa affidataria ed impresa esecutrice) di avere un valido strumento per il monitoraggio dei tempi (4D) e della produzione economica (5D); per rendere possibile ciò, occorre garantire il collegamento tra modello, pianificazione temporale e computo metrico estimativo. È necessario, quindi, un approccio ben strutturato alla modellazione che consenta la gestione dei tempi-costi in ogni elemento del modello, grazie all'introduzione di parametri 4D e 5D nel modello dati ovvero la corretta integrazione e continuità tra le singole attività WBS (Work Breakdown Structure), dati provenienti dal cantiere, dati contenuti nel Giornale dei Lavori Digitale (GLAD), il modello As-built e i dati presenti nel modello BIM. Per quanto riguarda invece l'implementazione della sesta dimensione (6D) la corretta raccolta e validazione dei dati, l'integrazione nel modello BIM e i protocolli di gestione dei dati diventano fondamentali.

Tra i dati che il modello BIM deve contenere per essere un efficace strumento in fase di gestione una WBS ben strutturata ed efficace sin dalla fase di progettazione è indispensabile per un efficace individuazione dei vari elementi. Un'efficace WBS definita già nel modello di progetto è il primo passo verso una facile gestione dei dati in fase d'uso e gestione dell'opera. La WBS è l'anello di congiunzione tra il modello informativo e gli elaborati contabili (Computo Metrico Estimativo) e temporali (GANTT). Dato che il modello è in grado di "leggere" le caratteristiche geometriche degli elementi contenuti al suo interno è possibile estrarre quantità di computo. Nella figura di seguito (Figura 2-4) viene riportato un esempio di parametri 4D (data inizio attività, data fine attività, ID Cronoprogramma, stato dell'oggetto) e parametri 5D (voce di capitolato Codice elenco prezzi, Categoria omogenea Categoria D.P.R. 207/2010 Corpo/Misura, WBS di computo, codice elenco prezzi (pGI), ecc.).

|    | Nome                          | Valore                |
|----|-------------------------------|-----------------------|
|    | Element Specific              |                       |
|    | Profile                       |                       |
|    | Anas_IfcIdentificativoOggetto |                       |
|    | Codice WBS                    | 01.PV.01.FS.03.PZF.01 |
|    | Gruppo anagrafica             | PILA2                 |
|    | Anas_IfcInformazioni4D        |                       |
|    | CO_Data fine attività         | 25/02/2023            |
|    | CO_Data inizio attività       | 18/02/2023            |
| 4D | ES_Data fine attività         | 25/02/2023            |
|    | ES_Data inizio attività       | 18/02/2023            |
|    | ID Cronoprogramma             | 01.PV.01.FS.03.PZF.01 |
|    | PE_Data fine attività         | 04/03/2023            |
|    | PE_Data inizio attività       | 25/02/2023            |
|    | Stato dell'oggetto            | Nuovo                 |
|    | Anas_IfcInformazioni5D        |                       |
|    | B.03.031.b                    | 22137.00€             |
|    | B.04.001                      | 1448.00€              |
|    | B.05.030                      | 20031.00€             |
| 5D | Categoria D.P.R. n. 207/2010  | OS 21                 |
|    | Categoria Omogenea            | FO - Fondazioni       |
|    | Corpo/Misura                  | Corpo                 |

Figura 2-4 Parametri 4D e 5D di un elemento infrastrutturale in BIM (Fonte Anas S.p.A.).

L' As-built prodotto e collaudato al termine del cantiere con elementi ed oggetti BIM associati a schede tecniche, certificati di collaudo e altri documenti ufficiali, piani di manutenzione, ecc. è il modello di base che serve per la gestione e manutenzione del Asset (*Asset Information Model*, detto anche AIM). La digitalizzazione di questo tipo di informazioni ed il loro grado di dettaglio è fondamentale per le attività di gestione e manutenzione. Permette, infatti di fornire risposte a domande come quali impianti possiedo? qual è la loro condizione? dove sono? quanto potranno funzionare ancora? qual è il loro valore economico? La risposta a queste domande può essere di livello strategico o operativo.

I tipici sistemi informatici con relativa interfaccia utente di gestione e manutenzione (detti CAFM/CMMS) servono, tra l'altro, a raccogliere e tenere aggiornati i dati per fornire siffatte risposte. Sulla base di dati legati alle strutture e agli impianti di un bene immobiliare o infrastrutturale quali condizioni, età, priorità rispetto al business e costo di rimpiazzo il proprietario/gestore ha le basi informative per decidere eventuali sostituzioni/interventi da eseguire.

I vantaggi, pertanto, correlati alla gestione della vita utile dell'opera (6D) sono [7]:

- miglioramento della messa in funzione e della trasmissione delle informazioni: durante il processo di costruzione l'impresa appaltatrice e gli appaltatori responsabili la realizzazione degli impianti (MEP Systems, Mechanical, Electrical and Plumbing) raccolgono informazioni sui materiali installati e sulle attività di manutenzione necessarie per gli impianti. Queste informazioni possono essere collegate a un oggetto specifico nel modello e quindi essere consegnate al proprietario per l'utilizzo del sistema di gestione e manutenzione.
- gestione e funzionamento ottimizzati degli impianti: il modello costruttivo offre una serie di informazioni grafiche e specifiche per tutti i sistemi impiantistici di cui è dotato. Per verificare l'efficacia delle scelte progettuali, una volta che l'opera è entrata in servizio, si possono fornire al committente le analisi pregresse che erano servite a definire gli impianti meccanici, i sistemi di controllo e altri componenti.
- integrazione con sistemi di funzionamento e sistemi di gestione: un modello che sia stato aggiornato con tutte le modifiche effettuate in fase di costruzione fornisce una fonte precisa di informazioni As-built sugli spazi e sui sistemi e rappresenta un punto di partenza utile per le attività di gestione e manutenzione, durante tutto il ciclo di vita dell'opera. Il modello BIM supporta infatti il monitoraggio in tempo reale dei sistemi di controllo, fornisce un'interfaccia naturale per i sensori e consente una gestione operativa remota degli impianti.

Un bene infrastrutturale è un bene complesso che è soggetto a molte specificità e la sua gestione con un'ottica a lungo termine si scontra con le decisioni che il management deve prendere a breve termine. Il sistema di monitoraggio e controllo della gestione dei beni infrastrutturali deve consentire una visione strategica di insieme e facilitare la gestione top-down della creazione di valore basata sulla definizione di quozienti misurabili i cosiddetti KPI (key performance indicator); i tipici KPI di FM che vanno a misurare, ad esempio, le condizioni fisiche di un impianto sono: FCI (facility condition index), MTBF (mean time between failure) e MTTR (mean time to repair).

I processi e gli operatori coinvolti generano una quantità enorme di dati che rimangono isolati in data silos (file excel, pdf, ecc.); la digitalizzazione dei processi (e la reportistica che da essa discende) è, invece, il fattore di svolta per riallineare il sistema di monitoraggio e controllo e permettere la gestione attiva dei rischi/ritorni degli investimenti in beni infrastrutturali. La scelta

degli strumenti di controllo e, quindi, dei tipici KPI dipende dalla profondità ed ampiezza che si intende dare al sistema di reportistica, ben sapendo che la disponibilità dei dati e la loro qualità dipende dal grado di consapevolezza digitale degli operatori e che la digitalizzazione ne è chiaro fattore abilitante.

Qualora l'infrastruttura o un suo impianto fosse connesso a sensori (integrazione con sistemi IoT certificati), e i suoi dati storici venissero processati con appositi algoritmi, tale gestione potrebbe divenire anche predittiva. Le attuali soluzioni CAFM/CMMS sono andate via via evolvendosi e stanno integrandosi con il BIM. Importano file IFC, possono essere interfacciate con database di costi relazionali e determinare in modo anche visuale le sostituzioni previste.

Contemporaneamente, si sono aggiunte funzionalità operative quali, ad esempio, la gestione degli impianti; tramite apposite applicazioni i gestori possono regolare da remoto ad esempio impianti di illuminazione, porte e sistemi di videocontrollo di un asset infrastrutturale integrando con i sistemi BMS (Bridge Management System) / TMS (Tunnel Management System) / PMS (Pavement Asset Management) ed utilizzando il modello BIM come dispositivo di controllo.

L'obiettivo di una piattaforma è facilitare la comunicazione tra gestori e gli utenti tramite l'elaborazione di avvisi di manutenzione con relativa priorità, sondaggi tra utenti e gestori e to-do list personalizzate per ogni attore coinvolto grazie anche all'integrazione con i sistemi di monitoraggio della struttura e sistemi di controllo IoT (Internet of Things). Le tipiche funzionalità di una soluzione di FM digitale sono:

- Gestione:
  - manutenzioni programmate e ticket d'intervento;
  - pianificazione delle risorse e della capacità;
  - monitoraggio delle prestazioni (SLA, KPI);
  - gestione costi;
  - gestione della parte documentale e dei flussi interni.
- Manutenzione:
  - monitoraggio impianti;
  - piano di manutenzione pluriennali;
  - flussi di lavoro;
  - monitoraggio SLA;
  - gestione ricambi;
  - blockchain certificata delle manutenzioni.
- Property management:
  - gestione contratti di manutenzione/recupero;
  - strategia di asset;
  - controllo dei costi;

## 2.5 Applicazioni BIM nel monitoraggio e nella manutenzione delle infrastrutture

Le sfide del settore delle infrastrutture e dei trasporti sono la sicurezza degli utenti, l'impatto ambientale, la congestione del traffico, l'adeguamento alle nuove tecnologie e la manutenzione delle infrastrutture incluse le corsie di circolazione, i ponti, i tunnel, le gallerie, i sottopassaggi, i sovrappassi, i raccordi di accesso e uscita, le aree di sosta, le barriere di sicurezza, i sistemi di illuminazione, ecc. Un'opera infrastrutturale, una volta realizzata e aperta al traffico, deve garantire la continuità funzionale, pertanto, necessita di una manutenzione continua e orientata alla



programmazione degli interventi secondo obiettivi prestazionali e scenari di rischio standardizzati; occorre, quindi, pianificare e supervisionare le attività di manutenzione per garantire una viabilità sicura ed efficiente e preservare l'integrità dell'infrastruttura nel tempo.

I metodi tradizionali per la manutenzione delle infrastrutture generalmente seguono un approccio di manutenzione correttiva con la chiara identificazione di un deterioramento che spesso è anche inefficiente a causa di una cattiva gestione delle informazioni. Le nuove metodologie incorporate nel settore AECO (Architecture, Engineering, Construction and Operations) consentono lo sviluppo della manutenzione preventiva delle infrastrutture. L'International Association of Facility Management definisce "Facility Management (FM)" come una disciplina che comprende varie aree per garantire e gestire il funzionamento di edifici e/o infrastrutture e dei servizi associati attraverso l'integrazione di persone, spazi, processi e tecnologie specifici di edifici o infrastrutture. In questo senso, una gestione delle informazioni corretta e affidabile facilita il processo decisionale nella fase di funzionamento e manutenzione (O&M). I sistemi tradizionali di FM, compresi la registrazione e l'aggiornamento delle attività di manutenzione, oramai obsoleti, sono caratterizzati da documentazione frammentata o dispersa di ogni elemento dell'infrastruttura. Pertanto, l'integrazione e l'uso del BIM in FM stanno diventando sempre più comuni.

Attualmente, è stato utilizzato per la manutenzione di asset edilizi o di grandi infrastrutture, facilitando l'accesso alle informazioni derivanti dalla digitalizzazione del modello BIM, che migliora i livelli di efficienza e produttività del settore ottimizzando i flussi di informazioni attraverso i formati di interoperabilità esistenti, riducendo significativamente i costi nella fase O&M in modo tale che tale integrazione diventi un potenziale per una gestione efficiente degli asset.

L'uso di modelli 3D parametrici consente di identificare le tipologie di elementi che compongono le infrastrutture e di avere il pieno controllo sulle informazioni di materiali, sulla pianificazione dei costi, sui tempi e sulle considerazioni ambientali che consentono un maggiore controllo ed efficienza nei processi di progettazione, costruzione, esercizio e conservazione.

I parametri generali introdotti nel modello per caratterizzare gli elementi sono:

- dati generali (modello, produttore, descrizione, codice identificativo);
- localizzazione;
- collegamenti (parametri URL all'interno di ogni oggetto all'interno dei quali collegare documentazione editabile richiamabile dal modello IFC prodotto nella fase As-built come scheda tecnica, manuale di installazione e di manutenzione e fogli elettronici contenuti in database terzi relativi alle schede di manutenzione) [8].

Il modello BIM può quindi essere visualizzato e interrogato tramite l'utilizzo un qualsiasi BIM viewer gratuito. La documentazione è richiamabile da modello attraverso i link URL associati ai parametri per ogni oggetto modellizzato. A questi è necessario introdurre parametri specifici per le attività manutentive necessari all'esecuzione di una corretta e programmata manutenzione dei componenti strutturali e impiantistici. In particolare, le informazioni sono il tipo e la descrizione di intervento, la frequenza e la durata (programmazione degli interventi manutentivi distinti tra quelli eseguibili direttamente dall'utente e quelli a cura di personale specializzato), il costo, descrizione delle risorse operative necessarie e della strategia, il livello minimo delle prestazioni e le anomalie riscontrabili. L'applicazione di questi parametri consente di ottenere abachi di sintesi per la valutazione e il calcolo dei costi legati alle attività manutentive, oltre che raggruppamenti più dettagliati dei componenti e degli asset tecnologici. Questo sistema gode dell'importante vantaggio di garantire la privacy ad una serie di informazioni senza per questo pregiudicare la modellazione BIM in ambito 6D: il modellatore genera il parametro e crea il collegamento; l'accesso ai dati di quest'ultimo può essere inibito al

personale non addetto alla gestione, chiudendo gli accessi al database collegato. Tale iter permette comunque di collezionare dati progressivamente aggiornati sullo storico delle manutenzioni e vincolando le informazioni ai singoli oggetti modellati. Tuttavia, se si desidera godere di un processo più automatizzato occorre sempre affidare al software di gestione la mole di parametri necessari alle attività di facility. Le strutture dei CDE sono tali oramai, che, impostando milestone predeterminate per l'esecuzione di un'attività (una manutenzione programmata), i software automatizzano le comunicazioni verso i device connessi al programma (app su smartphone o e-mail) in modo da garantire l'aggiornamento costante del processo di informazione.

Un modello BIM, se orientato alla fase di gestione, rappresenta per il gestore delle facilities un valido strumento di simulazione, pianificazione ed attuazione, anche grazie all'approccio tridimensionale correlato agli elementi parametrici presenti, per garantire il controllo e l'interoperabilità dei dati in modo intelligente [9]. L'obiettivo è quello di avere un modello utile a comprendere il funzionamento e la gestione dell'opera, con una struttura implementabile nelle diverse fasi in modo da garantire un As - built/as - is dell'infrastruttura, con i dati importanti necessari per il FM in una base aggiornata, coerente ed affidabile.

La creazione di un modello BIM di un'infrastruttura consente di organizzare le informazioni, aumentando la quantità di output e dati disponibili, e automatizzando il processo di produzione degli elaborati grafici, come piante, viste o sezioni, e gli abachi dei componenti. Ogni abaco offre la possibilità di visualizzare tutti i campi relativi al componente, i dati geometrici, gli attributi e i parametri relativi condivisi, consentendo un rapido accesso alle informazioni. L'interfaccia grafica 3D aiuta l'utente a comprendere l'insieme degli elementi e la loro posizione.

La potenzialità di uno strumento BIM si esprime nella possibilità di caratterizzare il modello, con le informazioni specifiche correlate, sia in forma grafica che numerica, ma soprattutto nella capacità di rispondere ad interrogazioni complesse. Una volta modellati gli elementi ed inserite le informazioni, è possibile richiamarli in modo strutturato attraverso abachi, impostati per tipologia; ciò garantisce un quadro completo dei componenti e degli asset tecnologici presenti e che le relative informazioni vengano aggiornate automaticamente in caso di variazioni. In particolare, l'aggiornamento più semplice ed efficiente di questo tipo di dati è possibile grazie all'interazione e all'interoperabilità del BIM con piattaforme Computer Aided Facility Management (CAFM) e specifici plug-in per l'acquisizione automatica dei Facility Data precedentemente definiti. La precisione nel definire e caratterizzare le famiglie degli asset è fondamentale per avere un database condivisibile per la popolazione automatica delle applicazioni di Computerized Maintenance Management System (CMMS) per una migliore qualità dei dati. Sempre più si è iniziata a diffondersi l'idea che il BIM combinato con FM sia un processo che mira alla sostenibilità, tanto da essere chiamato il binomio Sustainable Facility Management (IFMA, IFMA Foundation, John Wiley & Sons Inc., BIM for Facility Managers / Teicholz P. editor, 2013). In sede di redazione del piano di gestione informativa (pGI), oltre a individuare la piattaforma di gestione adeguata ai soggetti responsabili delle parti di processo, il BIM Manager pianifica nel dettaglio l'insieme di attributi afferenti alle specifiche di Space e Asset Management, Facility Maintenance e Logistic Maintenance. La mole di parametri dedicate alla gestione deve pertanto essere discussa con la committenza e soprattutto con l'utilizzatore finale dei modelli, al fine di garantire la migliore fruizione degli stessi.

Le nuove metodologie e tecnologie permettono di ottimizzare i flussi di lavoro attraverso strumenti che consentono la collaborazione e l'integrazione delle informazioni, evolvendo così i metodi tradizionali. Il BIM consente l'integrazione e la collaborazione tra le parti interessate in un progetto attraverso modelli parametrici a diversi livelli di dettaglio e può essere utilizzato per tutto il ciclo di vita di un progetto. Oltre alla visualizzazione tridimensionale, con potenziale accesso alle informazioni, la metodologia BIM facilita l'aggiornamento del modello e dei parametri inseriti senza

perdita di informazioni. In questo modo, una volta creato il modello, è possibile modificare i suoi parametri e aggiungere e/o rimuovere gli elementi necessari per avere un modello aggiornato e affidabile che sia accessibile a tutti gli attori del progetto.

Grazie alla disponibilità di informazioni e dati relativi alle caratteristiche proprie dell'infrastruttura e degli impianti presenti contenute nel gemello digitale (Digital Twin), il Facility Manager può definire le migliori strategie di gestione e pianificare le attività da svolgere ricorrendo anche alla simulazione in VR (Virtual Reality).

Eventuali modifiche vengono aggiornate nel Digital Twin, creando un modello completo e dinamico che può rappresentare le condizioni reali della struttura e degli impianti e costituire un valido supporto che semplifichi la fase di analisi e di elaborazione progettuale per possibili interventi futuri di manutenzione. In questo modo, è possibile studiare nuovi modelli decisionali strategici per garantire la migliore gestione possibile del manufatto aprendo anche alla manutenzione predittiva. Prima di realizzare fisicamente queste azioni all'interno dell'infrastruttura, è possibile simulare diversi scenari, testare diverse strategie e soluzioni e ipotizzare la messa in funzione di impianti.

L'utilizzo della metodologia BIM per il FM è sempre più di interesse per gli Enti gestori, pertanto, a partire dalla fase di progettazione e costruzione, fino alla fase di dismissione dell'infrastruttura inclusa la fase più importante di gestione, è necessario stabilire un ambiente di condivisione, raccolta e conservazione dei dati prodotti (CDE – Common Data Environment/ACDat) che promuova la collaborazione e lo scambio di informazioni tra tutti gli attori coinvolti. Questo porta ad un'ottimizzazione dei tempi delle attività di gestione migliorando l'efficacia e l'efficienza.

Inoltre, i modelli BIM delle opere devono essere arricchiti con i dati raccolti in tempo reale da sensori IoT, e garantire così un monitoraggio costante ed interventi tempestivi e mirati. L'obiettivo della manutenzione programmata è superare la logica dell'intervento episodico o emergenziale attraverso una lettura approfondita delle caratteristiche dell'infrastruttura e degli eventi che si verificano su questa o al suo intorno per intervenire prevenendo problemi legati alla sicurezza, alla funzionalità o al comfort degli utenti. Una visione programmatica ha vantaggi diretti per gli utenti dell'opera in termini di maggior continuità e qualità dei servizi e per la collettività in termini di contenimento dei costi di intervento. Inoltre, ha benefici indiretti per il Paese in termini di valorizzazione e riqualificazione di un imponente patrimonio infrastrutturale che oggi mediamente è in fase avanzata del suo ciclo di vita.

La programmazione degli interventi preventivi o correttivi di manutenzione ordinaria o straordinaria integra due aspetti fondamentali e tra loro interconnessi:

- la conoscenza dell'infrastruttura e delle sue condizioni in uso;
- la conoscenza del territorio limitrofo all'infrastruttura e delle sue evoluzioni.

Fondamentale per gli interventi di manutenzione che mirano alla conservazione e, quando necessario, al ripristino delle caratteristiche strutturali e funzionali delle infrastrutture stradali, delle opere d'arte o di singoli elementi strutturali è la fase di progettazione. Proprio in questo quadro, negli ultimi anni è stato sviluppato il concetto, ad esempio, di "strada vestita": tutti gli aspetti relativi alla manutenzione delle strutture e degli impianti tecnologici vengono previsti già nella fase di progetto in base allo standard di BIM che integra tutti gli elementi caratterizzanti dell'infrastruttura. Il processo che include tutte le attività necessarie per garantire una corretta gestione e manutenzione del patrimonio infrastrutturale esistente prende il nome di "*Infrastructure Asset Management*" (Figura 2-5).

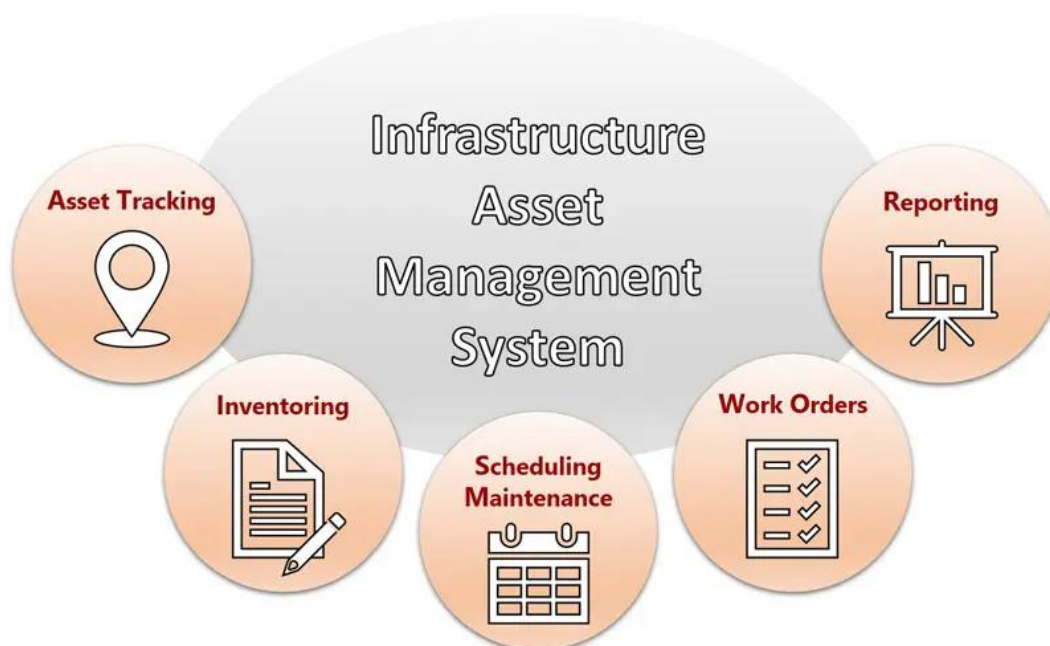


Figura 2-5 Infrastructure Asset Management, Fonte [S10].

Per eseguire correttamente le strategie di valorizzazione degli asset infrastrutturali esistenti, i gestori sempre più ricorrono ad una gestione digitale degli Asset tramite l'Intelligent Asset Management dove integrano i processi di ingegneria ed Operation e mettono l'Asset al centro dei processi (Figura 2-6).

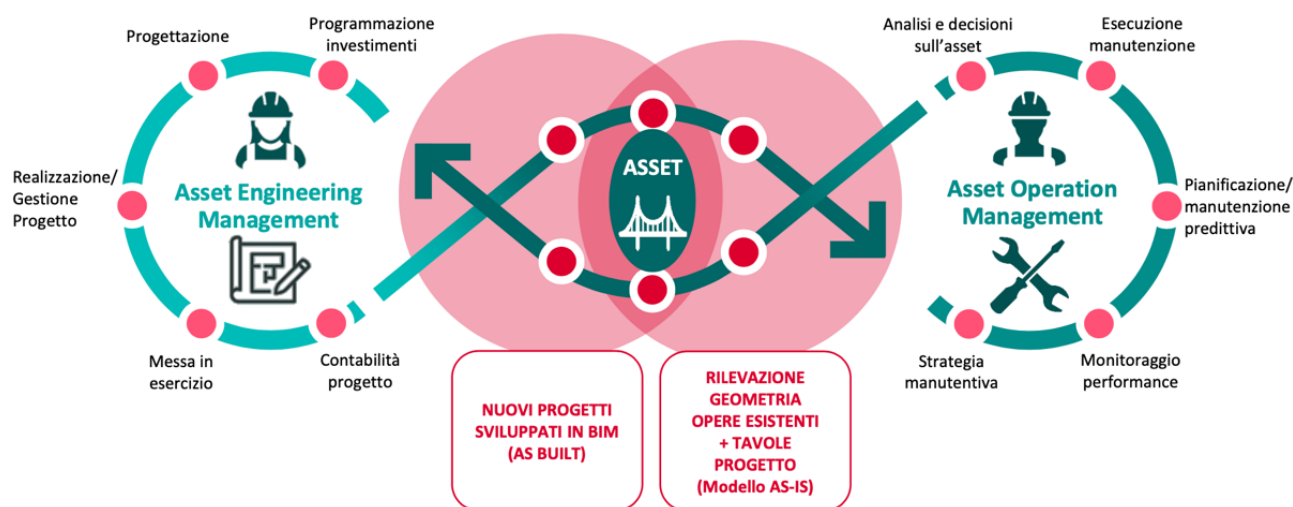


Figura 2-6 Asset al centro del processo gestionale (Fonte Anas S.p.A.).

I gestori ricorrono quindi all'uso di software avanzati che consentono di:

- raccogliere e accedere a tutte le informazioni relative all'opera;
- usare i sistemi di georeferenziazione per determinare esattamente dove si trovano gli asset;
- creare un inventario e tenere nota dei dettagli e delle caratteristiche di ogni singola risorsa (come il tipo di materiale, le sue prestazioni, il prezzo, la data di installazione, il produttore, ecc.);
- programmare ispezioni e valutazioni periodiche necessarie per determinare la condizione dei beni;

- pianificare misure proattive basate sul monitoraggio e sull'analisi dei dati per risolvere le problematiche prima che si verifichino e ridurre il rischio di interruzioni impreviste;
- gestire gli ordini di lavoro e tenere traccia di tutte le riparazioni e i miglioramenti, indicando per ciascuno di essi la data di esecuzione, la tipologia di intervento, il costo, ecc.;
- sfruttare l'integrazione con le tecnologie dell'intelligenza artificiale (AI) e dell'Internet of Things (IoT) per effettuare ispezioni visive in tempo reale, monitorare gli asset da remoto, migliorare la manutenzione predittiva, ottimizzare i processi decisionali, ecc.

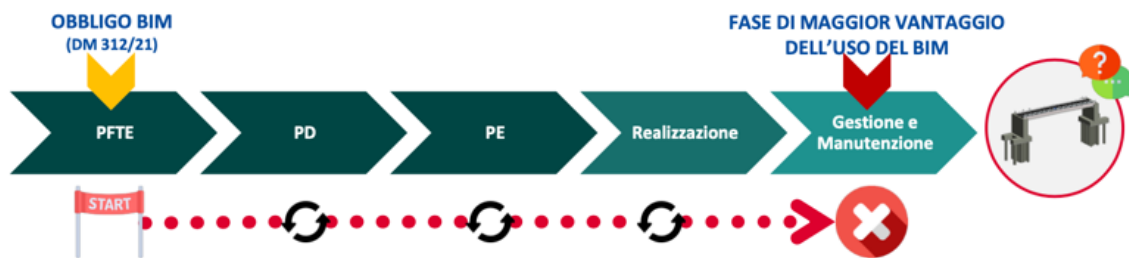


Figura 2-7 Esclusione dall'obbligatorietà degli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria (ad eccezione delle opere precedentemente eseguite con l'uso del BIM nel Decreto Legislativo 36/2023 e nel precedente Codice dei Contratti Pubblici (D.Lgs. n.50/2016), (Fonte Anas S.p.A.).

Perciò, gli enti gestori si stanno mobilitando per implementare l'uso della metodologia BIM durante la fase di gestione e manutenzione di un'opera infrastrutturale (non obbligatorio per il D.Lgs. n. 50/2016 "Decreto BIM", Figura 2-7); ciò consentirebbe di perseguire i risparmi che la metodologia BIM prevede nella fase di gestione dell'asset, che altrimenti andrebbero persi (Figura 2-8).

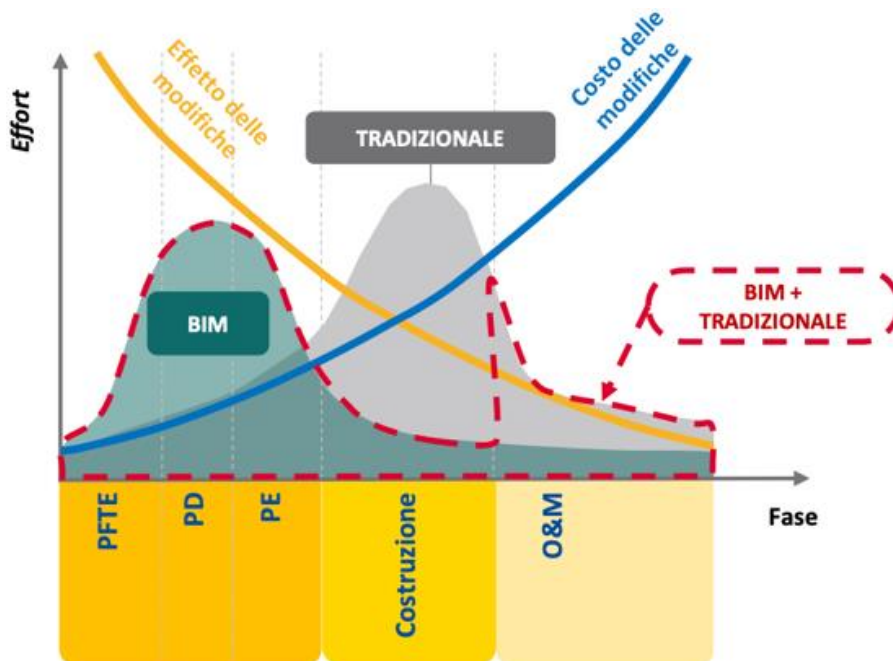


Figura 2-8 Metodologia BIM vs tradizionale - MacLeamy curve Effort (Fonte Anas SpA).

Nel prossimo futuro si assisterà, pertanto, a:

- una maggiore automatizzazione dei processi, per la completa digitalizzazione dei principali workflow, mediante formati aperti e interoperabili;
- l'utilizzo di modelli digitali durante la fase di realizzazione delle opere;
- l'integrazione di dati e informazioni dei modelli digitali nei sistemi aziendali di gestione e manutenzione degli asset.

Inoltre, il BIM assume un ruolo centrale nei processi di comunicazione della filiera AECO e, associato alle nuove tecnologie e forme di comunicazione, consente di arricchire la percezione sensoriale dell'opera e di stabilire sia con gli utenti che con gli operatori del settore, un alto grado di interazione. In fase gestione dell'Asset, la realtà aumentata (AR) e virtuale (VR) sono utilizzate per la visualizzazione dei dati, promuovendo soluzioni avanzate nell'ambito dei processi di manutenzione. La AR, infatti, permette la visualizzazione delle geometrie tridimensionali e/o informazioni numeriche, tramite la sovrapposizione dinamica dei dati virtuali al mondo reale. La Virtual Reality, invece, permette l'immersione in un ambiente virtuale, generato mediante computer e software, che simula il mondo reale, attraverso l'isolamento di tutti o dei principali sensi umani. La prima tecnica prevede l'utilizzo di smartphone o tablet per la visualizzazione dei contenuti virtuali, la seconda tecnica consiste nell'utilizzo di visori come Oculus Rift, che permettono l'immersione dell'utilizzatore nel mondo virtuale. L'utilizzo di queste tecnologie è innumerevole come, ad esempio, l'utilizzo di smart devices quali "Smart glasses" e dei visori per la visualizzazione della documentazione di as-is (stato di fatto di un Asset) /As-built, schede di manutenzione di asset specifici, il posizionamento e visione d'insieme degli elementi, istruzioni operative per la formazione del personale e la visualizzazione di scenari alternativi di intervento. In questo modo le informazioni necessarie per gli interventi di manutenzione sono immediatamente disponibili, senza doverle ricercare, riducendo così gli errori ed ottimizzando i tempi, ossia costituendo un primo approccio per una gestione intelligente ed integrata [6].

Infine, nel settore AECO sono emerse nuove tecnologie per risolvere i problemi di accesso, raccolta di informazioni e ricostruzione digitale delle infrastrutture esistenti. Tra queste tecnologie, i laser scanner terrestri (TLS) sono strumenti di acquisizione di punti di massa molto utili per la ricostruzione dei modelli digitali da nuvole di punti. Sebbene questo strumento consenta un'acquisizione di dati massiccia, rapida e accurata, generando una nuvola di punti ad alta risoluzione, questi tipi di strumenti sono apparecchiature ad alto costo e richiedono professionisti altamente qualificati per il loro funzionamento, pertanto il loro uso massiccio è restrittivo. D'altra parte, i veicoli aerei senza pilota (UAV) sono veicoli aerei comandati a distanza che sono diventati un metodo comune per la mappatura e la ricostruzione digitale di infrastrutture che, per la loro economia e praticità, sono preferite rispetto all'uso dei TLS. A differenza della tradizionale ispezione visiva dei piani di manutenzione, l'uso degli UAV consente di effettuare ispezioni in tempi molto più brevi, consentendo a loro volta ispezioni più frequenti, aumentando la ricorrenza degli aggiornamenti dello stato strutturale degli elementi dell'infrastruttura ispezionata e fornendo così le informazioni per il modello digitale [6].

Nel seguente capitolo vengono descritte le tecnologie e le tecniche di rilievo Laser scanner, in particolare il TLS terrestre.

### 3. Tecnologie e tecniche di rilievo Laser Scanner

Nel settore AECO, il termine "rilievo" si riferisce al processo di acquisizione, raccolta dati utili e sufficienti per consentire la ricostruzione di un manufatto in modo da poter riportare i dati raccolti, come misure geometriche, in forma di disegni grafici o di modelli digitali 3D completi, precisi ed affidabili [6]. Un rilievo può essere realizzato utilizzando diversi strumenti di misurazione e metodi più o meno avanzati, sia per l'acquisizione dei dati in situ sia per la loro elaborazione. Una metodologia di rilievo e modellazione 3D il più delle volte viene studiata combinando diverse tecniche, cercando di sfruttare i vantaggi e sopperire agli eventuali limiti di ciascuna singola tecnica [Remondino, 2011]; ciò consente sia di migliorare la qualità e la precisione del dato di output sia di ridurre le tempistiche delle operazioni di rilievo. Infatti, al momento, non esiste una singola tecnica di rilievo portatile e flessibile, in grado di fornire, allo stesso tempo, risultati accurati con costi contenuti e in tempi rapidi. Pertanto, l'integrazione di diverse tecniche di rilievo viene generalmente adottata per rilevare siti molto estesi e complessi [El-Hakim et al., 2007; Stamos et al., 2008; Guidi et al., 2009]. La scelta della tecnica migliore, degli strumenti e della mole di dati da impiegare dipende da molti fattori, tra cui l'esperienza, il tipo di oggetto o scena da rilevare, il materiale, le caratteristiche della superficie da rilevare, lo scopo del rilievo, l'accuratezza, il livello di dettaglio geometrico richiesto, oltre al budget del progetto. Identificare il migliore approccio è la prima e fondamentale fase per riuscire a ottenere gli obiettivi prefissati. [Remondino, 2011].

Le tecniche di rilievo sono normalmente classificate in base al loro principio di funzionamento e se comportano o meno un contatto fisico tra l'oggetto da misurare e lo strumento di misura [Remondino, 2011] (Figura 3-1).

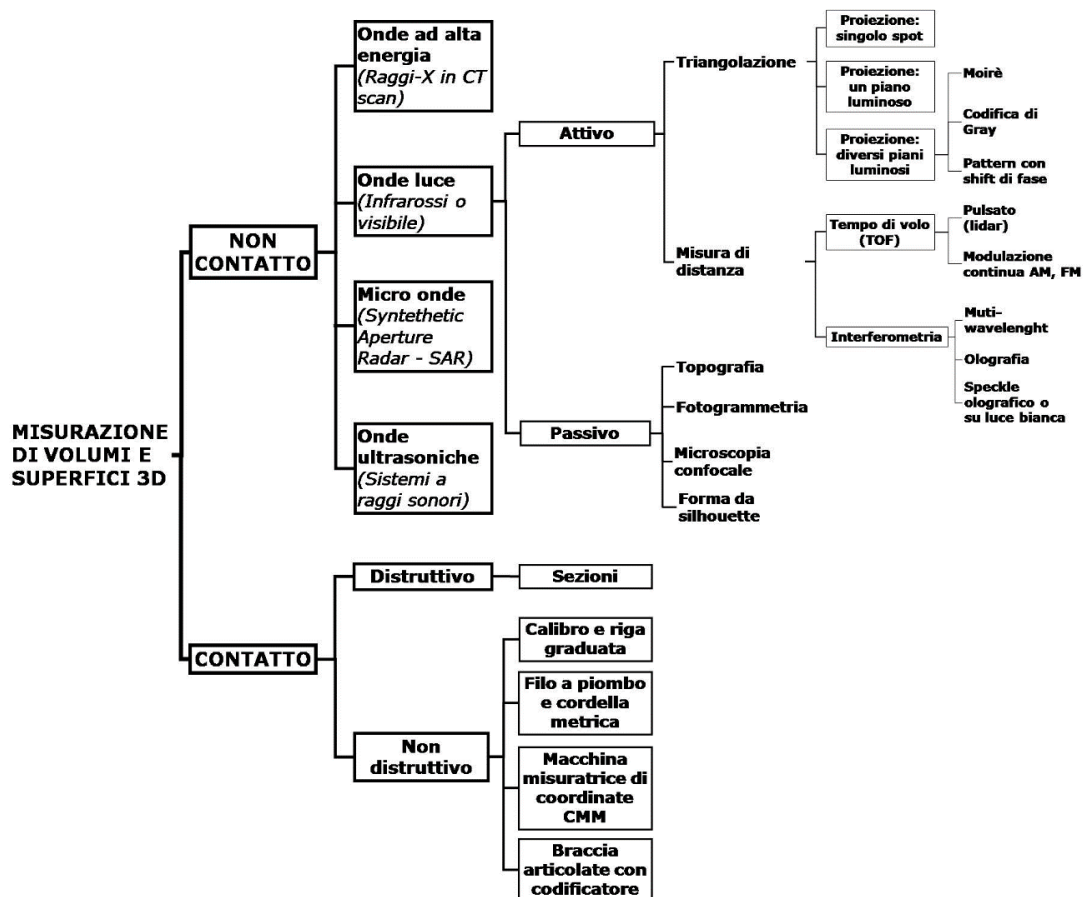


Figura 3-1 Strumenti e tecniche per rilievi e misure 3D (Fonte, F. Remondino, 3D surveying and modelling of complex architectural sites and heritage objects, Archeologia e Calcolatori, 22, 2011.).

Le tecniche di rilievo senza contatto sono ovviamente le più ricercate, soprattutto nel settore dei beni culturali o per grandi strutture e siti [Remondino, 2011]. Queste tecniche, poiché restituiscono la realtà come si presenta al momento del rilievo, sono anche dette *reality-based* e si possono classificare in:

- tecniche basate su sensori ottici *passivi* (metodi image-based) [Remondino & El-Hakim, 2006]: esse sfruttano la luce naturale presente nell'ambiente per acquisire immagini da elaborare successivamente per derivarne informazioni 3D della scena osservata, come ad esempio la fotogrammetria. La fotogrammetria è la scienza che consente di ottenere misure e ricostruzioni 3D accurate da fotogrammi [Mikhail et al., 2001; Luhmann et al., 2006]. Partendo da punti omologhi individuati nelle immagini, la tecnica fotogrammetrica consente di determinare informazioni metriche sulle dimensioni, forma e posizione di un oggetto o scena. Una volta ricostruita questa relazione mediante l'utilizzo di un modello basato sulle equazioni di collinearità, è possibile ottenere informazioni metriche e 3D sull'oggetto attraverso l'impiego di almeno due immagini [Remondino, 2011].
- tecniche basate su sensori ottici *attivi* (metodi range-based): esse impiegano strumenti che emettono un segnale elettromagnetico (nel campo del visibile, infrarosso, raggi X, ecc.) che viene poi registrato e codificato dallo strumento al fine di derivarne una misura di distanza (range) [Vosselman & Maas, 2010]. Strumenti range-based sono i laser scanner.

### 3.1 Laser Scanner

La tecnica di rilevamento digitale più utilizzata in applicazioni ingegneristiche per creare un modello As-built, per monitorare un bene/asset o per generare in modo rapido un modello 3D del costruito è la tecnica *laser scanning* detta anche *LIDAR*, acronimo inglese di "*Light Detection and Ranging*" o "*Laser Imaging Detection And Ranging*". Tale metodologia è una tecnica di rilievo geometrico digitale indiretto non invasiva (senza contatto) per acquisizioni terrestri (*TLS – Terrestrial Laser Scanner*) o aeree (*ALS – Airborne Laser Scanner*) di un elemento esistente; basata su sensori ottici attivi, consiste nella misurazione delle distanze per mezzo di onde elettromagnetiche, ovvero un *laser* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*).

Dal punto di vista applicativo, il *laser*, è uno strumento che trasforma l'energia da una forma primaria (di natura elettrica, ottica, chimica, termica o nucleare) in un fascio monocromatico e coerente di radiazioni elettromagnetiche di intensità elevata. Le caratteristiche del *laser scanner* sono:

- monocromaticità: è composto da una sola frequenza;
- coerenza spaziale e unidirezionalità: è caratterizzato da un'onda che non viene irradiata in tutte le direzioni come quella delle sorgenti di tipo tradizionale, ma la cui forma si mantiene sinusoidale nello spazio e si propaga in una direzione ben definita e con divergenze minime per elevate distanze;
- coerenza temporale: le onde che compongono il laser sono della stessa frequenza e della stessa fase per sommarsi l'una all'altra generando un fascio di luce che può essere spinto ad elevata intensità e ad elevata potenza; ciò dipende dalla strumentazione scelta e dalle condizioni ambientali.

I *laser scanner* sono apparecchiature in grado di effettuare in modo diffuso la rilevazione automatica e in breve tempo di milioni di punti 3D secondo tre coordinate sferiche X, Y, Z calcolate rispetto al centro strumentale. La rilevazione viene definita "*nuvola di punti*" (Point Cloud), la cui risoluzione è definita in ragione della specifica griglia di acquisizione, secondo una densità di punti definita dalla



velocità e dal passo delle rotazioni dello scanner. La risoluzione, legata al passo angolare minimo dello strumento, rappresenta la quantità di punti che descrivono la superficie rilevata e quindi i dati che vengono immagazzinati con la singola scansione: maggiore è la risoluzione, maggiore sarà la quantità di dati acquisiti e maggiore sarà anche il peso dei file di scansione generati da maneggiare in fase di post elaborazione.

A ciascun punto rilevato, oltre all'informazione legata alla sua posizione in un sistema di coordinate locale, o eventualmente un sistema di coordinate globale, vengono attribuiti i dati con il valore della *riflettanza*. Essa indica la porzione di luce incidente che una data superficie è in grado di riflettere, e quindi, l'intensità con cui il segnale ritorna al sensore dello strumento. Il suo valore dipende dalle caratteristiche e dalla scabrosità del materiale di cui è costituita la superficie scandita, dalla temperatura della superficie, dalla presenza di umidità o di irraggiamento solare diretto e dall'angolo di incidenza del raggio laser. Tale valore viene ordinato nella griglia di acquisizione insieme alle coordinate spaziali del punto indagato. Questi dati sono organizzati in modo tale da generare un'immagine 2D in scala di grigi che prende il nome di immagine di riflettanza, in cui ad ogni pixel dell'immagine sono associate le coordinate x, y, z del punto relativo ed un valore da 1 a 256 per il corrispettivo valore di riflessione.

Inoltre, il laser scanner se dotato di un sensore radiometrico integrato o di integrazione con fotocamere digitali, è possibile sovrapporre immagini digitali associando a ciascun punto l'informazione radiometrica (RGB), al fine di ottenere modelli 3D fotorealistici di più facile comprensione. Nella rilevazione con laser scanner è importante progettare l'area di ripresa e i sistemi di riferimento in modo tale da avere più nuvole tra loro sovrapponibili che riducono o eliminano eventuali zone d'ombre non battute dal laser. Per ottenere nuvole di punti georeferenziate, sovrapposte, filtrate da rumori ed errori, e colorate con sovrapposizioni di immagini (RGB), i laser scanner necessitano di una stazione totale o un GNSS.

### 3.1.1 Tipologie di strumenti laser scanner

Vi sono varie tipologie di laser scanner; in base al principio di funzionamento utilizzato per analizzare il segnale laser di ritorno allo strumento dopo la riflessione sulla superficie dell'oggetto considerato, si differenziano in due categorie: i *scanner a triangolazione (triangulation scanners)* e i *scanner a misura diretta della distanza (ranging scanners)*. Nei *scanner a triangolazione* l'emettitore e il ricevitore sono separati da una distanza nota a priori detta *baseline* sulla quale si basa il principio della triangolazione. Nei *scanner a misura diretta della distanza*, invece, la posizione dell'emettitore laser e del ricevitore coincidono.

#### *Laser scanner triangolatori*

Il metodo della triangolazione è stato sviluppato da Talete nel VI secolo a.C. e consente di determinare una distanza  $z$  una volta noto un lato ( $x$ ) e due angoli ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) (Figura 3-2).

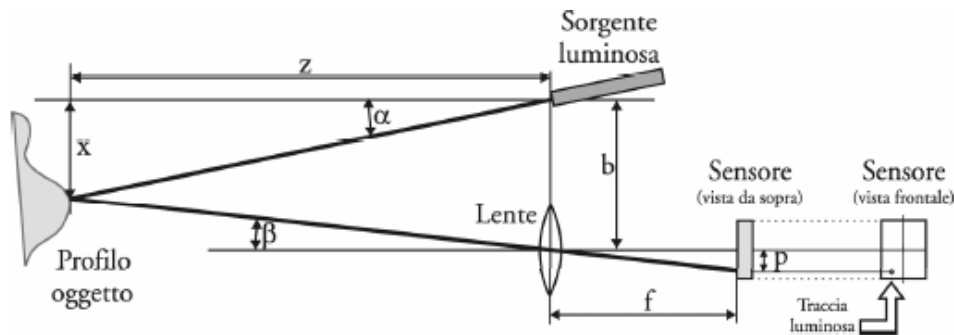


Figura 3-2 Schema di funzionamento dei laser scanner triangolatori basato sul metodo della triangolazione.

Una sorgente luminosa emette un raggio laser, che deflesso secondo un passo incrementale mediante uno specchio rotante, colpisce la superficie dell'oggetto indagato; il segnale riflesso viene catturato da un sensore d'immagine (camera digitale), posto ad una distanza predefinita e calibrata ( $b$ ) rispetto al proiettore laser. Ogni punto-oggetto può essere visto come il vertice di un triangolo la cui base è nota ( $x$ ) e di cui è noto l'angolo  $\alpha$ ; la sua posizione (e quindi la profondità  $z$ ) è definita per intersezione in avanti ricavando l'altro angolo alla base  $\beta$  che si desume dalla posizione del segnale riflesso nel campo visivo della camera misurando  $p$ . In particolare, valgono le seguenti relazioni sul piano  $y=0$ :

$$z = x \cdot \tan \alpha$$

$$\tan \beta = \frac{p}{f}$$

$$z = \frac{b}{\tan \alpha + \tan \beta}$$

$$x = \frac{z}{\tan \alpha}$$

Nei laser scanner triangolatori la precisione della misura ( $\sigma$ ) è inversamente proporzionale al quadrato della distanza del punto indagato dallo strumento. Generalmente, al variare delle caratteristiche degli strumenti, già a 5-10 m la  $\sigma$  è maggiore di 1 cm. Per piccole distanze invece, possono garantire precisioni sub-millimetriche (di qualche millesimo di millimetro).

$$\sigma_x \cong \sigma_y = \sqrt{\left(\frac{1}{\tan \alpha}\right)^2 \sigma_z^2 + \left(\frac{z}{\cos^2 \alpha}\right)^2 \sigma_\alpha^2}$$

$$\sigma_z = \sqrt{\left(\frac{z^2}{fb}\right)^2 \sigma_p^2 + \left(\frac{z}{\cos^2 \alpha}\right)^2 \sigma_\alpha^2}$$

### Laser scanner distanziometrici

I laser scanner distanziometrici, invece, sono laser scanner 3D costituiti da un distanziometro elettro-ottico privo di prisma e da un sensore ad alta precisione che ne registra la risposta.

I distanziometri elettro-ottici, detti anche EODM (Electro Optical Distance Measurement) o semplicemente EDM (Electromagnetic Distance Meter), utilizzano un fascio di luce infrarossa con

una lunghezza d'onda vicino al campo dell'infrarosso (circa 0,7-0,8 micron) che ha un'ottima capacità di penetrazione nel velo atmosferico. Esistono due tipologie di distanziometri elettro-ottici:

- EDM a misura di fase;
- EDM a impulsi.

I primi misurano il *range* oggetto - ricevitore mediante le differenze di fase tra segnale emesso e quello di ritorno mentre i secondi mediante il principio del tempo di volo, in inglese denominato con l'acronimo "TOF" (*Time Of Flight*) ovvero il tempo impiegato dal segnale emesso per ritornare al sensore.

#### Laser scanner distanziometrici a misura di fase

I *laser scanner distanziometrici a misura di fase* utilizzano come campione di misura la lunghezza d'onda di un segnale sinusoidale modulato su una portante (onda armonica) infrarossa con la tecnica della modulazione di ampiezza. Il distanziometro comprende un trasmettitore che emette un fascio di luce infrarossa e un ricevitore. Il fascio di luce colpisce un oggetto (o un prisma riflettente) che si limita a rinviarlo indietro (riflettore passivo) deviandolo di 180° verso il trasmettitore. La luce compie quindi un percorso di andata e ritorno (sistema definito "Two-Way Ranging System"). La fase del segnale emesso viene confrontata con quella del segnale riflesso da un dispositivo all'interno del distanziometro detto *comparatore* (o *discriminatore*) di fase, determinando lo sfasamento angolare  $\varphi$  tra le due sinusoidi; tale sfasamento dipende dalla distanza esistente tra il distanziometro e l'oggetto. Nel percorso di andata e ritorno (pari al doppio della distanza inclinata) risulta, quindi, compreso un numero intero  $n$  di lunghezza d'onda, detta *ambiguità*, più una frazione di lunghezza d'onda corrispondente allo sfasamento. Sussiste pertanto la seguente relazione detta *equazione fondamentale dei distanziometri a misura di fase*:

$$d = \frac{\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} + n \frac{\lambda}{2}$$

Per misurare una distanza con un distanziometro ad onde occorre determinare, quindi, i valori dello sfasamento  $\varphi$ , della lunghezza d'onda  $\lambda$  e valutare correttamente il numero intero di mezza lunghezze d'onda. Lo sfasamento viene determinato dal comparatore che confronta l'onda trasmessa con quella ricevuta (*Figura 3-3*).

Tale sistema, utilizzando particolari algoritmi di elaborazione del segnale, può permettere di ottenere risultati di elevata accuratezza. La necessità di risolvere eventuali ambiguità di fase generalmente limita la portata in distanza di tali strumenti.

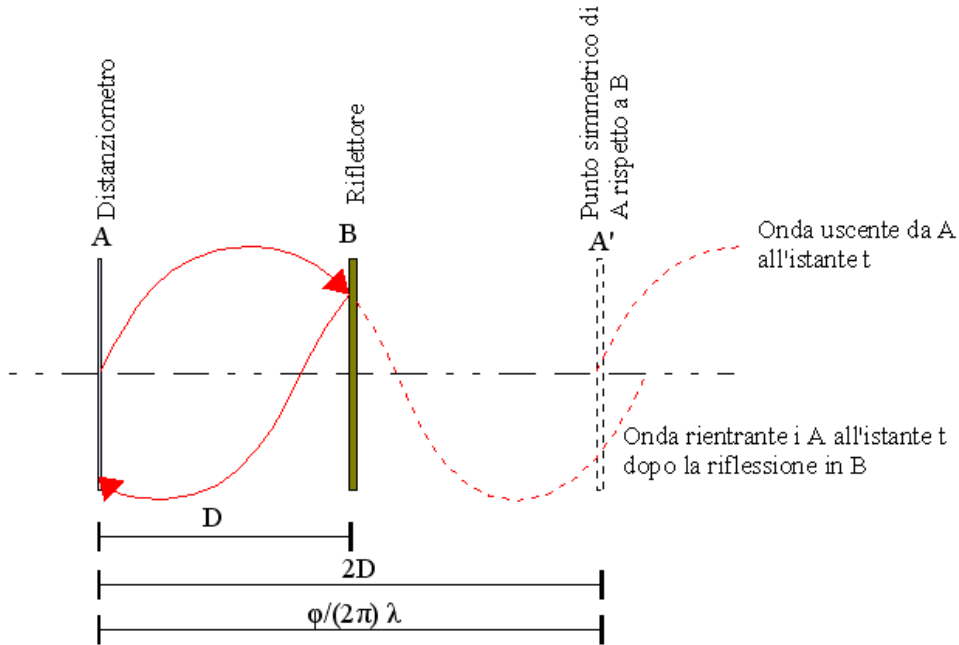


Figura 3-3 Determinazione dello sfasamento  $\varphi$  tra l'onda trasmessa e quella ricevuta.

La lunghezza d'onda  $\lambda$  del segnale trasmesso (onda modulata) si ottiene da:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

dove  $v$  è la velocità di propagazione della luce nell'atmosfera ed  $f$  la frequenza del segnale.

La frequenza  $f$  del segnale viene determinata come sottomultiplo intero di una frequenza fondamentale generata da un oscillatore contenuto nel distanziometro.

#### Laser scanner distanziometrici a impulsi

Nel caso dei *laser scanner distanziometrici ad impulsi*, invece, il distanziometro emette un impulso (segnale di brevissima durata ed elevata intensità) di luce infrarossa laser (fascio di luce molto sottile e concentrato). Una breve sequenza di impulsi compie il percorso di andata e ritorno (Figura 3-4) (dal distanziometro al riflettore e viceversa) alla velocità di propagazione  $v$  nell'atmosfera. La velocità  $v$  si suppone costante ed è stimabile in funzione delle condizioni atmosferiche. La distanza inclinata percorsa dall'impulso emesso che viene riflesso dal punto collimato (prisma o punto naturale) è proporzionale al tempo  $\Delta t$ , detto *tempo di volo (TOF)*, necessario all'impulso a compiere il percorso di andata e ritorno; misurando, quindi, il tempo di volo dell'impulso tra l'emissione dell'impulso e la sua ricezione e considerando la sua velocità di propagazione pari alla velocità della luce  $c$  si ha:

$$2D = c \Delta t$$

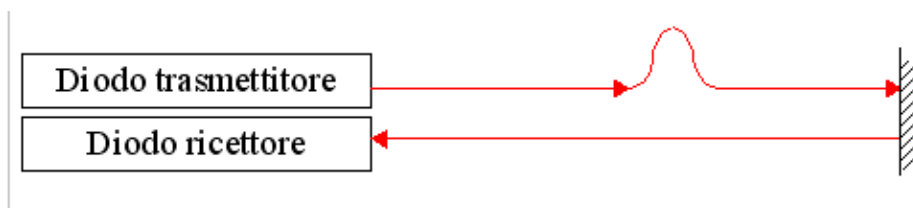


Figura 3-4 Percorso di andata e ritorno del laser.

Il tempo è quantificato da un orologio stabilizzato al quarzo che invia il dato ricevuto ad un microprocessore interno allo strumento che, a sua volta, determina la misura della distanza. Tuttavia, la misura del tempo avviene con un certo errore, che negli orologi al quarzo non supera  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  s. È necessario, quindi, un affinamento della misura del tempo, che è ottenuta determinando la frazione del periodo di oscillazione dell'orologio tra la partenza dell'impulso e la sua ricezione. La misura  $\Delta t$  avviene, pertanto, tramite la seguente relazione:

$$\Delta t = nT + t_a - t_b$$

dove  $T$  è il periodo dell'orologio,  $n$  è il numero di periodi e  $nT$  è la misura del tempo fornita direttamente dall'orologio mentre  $t_a$  e  $t_b$  sono rispettivamente il tempo intercorso tra l'emissione del segnale e l'inizio dell'oscillazione dell'orologio e il tempo trascorso dalla ricezione del segnale all'ultimazione dell'oscillazione completa dell'orologio (Figura 3-5).

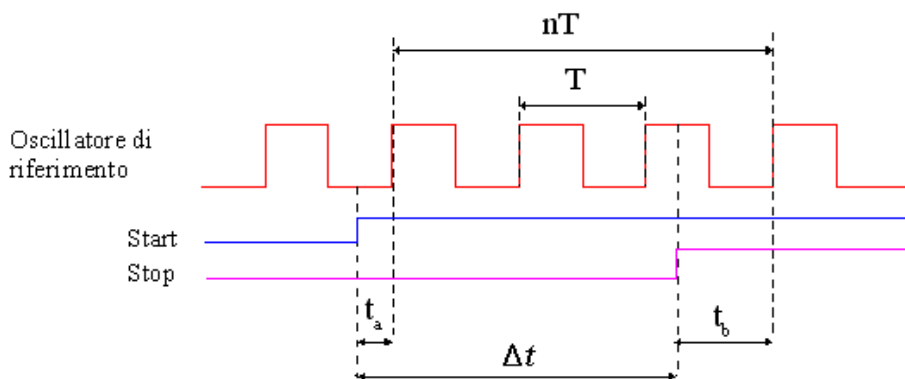


Figura 3-5 Calcolo del tempo di volo  $\Delta t$ .

Per avere una sensibilità di un millimetro sulla distanza si richiede nella misura di tempo una sensibilità dell'ordine di alcuni picosecondi. Ciò è impossibile con qualsiasi orologio, pertanto, viene utilizzato un circuito elettronico. Per determinare, quindi, con precisione queste due frazioni di tempo  $t_a$  e  $t_b$  si usa un convertitore tempo - tensione: esso è costituito da un condensatore che viene caricato da una intensità di corrente gradualmente, per i tempi in oggetto, in modo lineare (Figura 3-6). Nota la tensione raggiunta  $Q$  per un tempo di carica corrispondente ad un periodo di oscillazione completa dell'orologio ( $T$ ), è possibile calcolare i tempi residui in funzione della tensione in essi raggiunte dal condensatore tramite la seguente proporzione:

$$\frac{t}{q} = \frac{T}{Q}$$

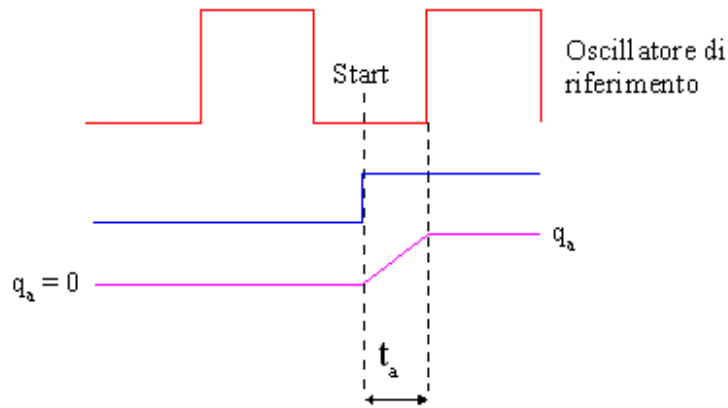


Figura 3-6 Stima dei tempi residui in funzione della tensione.

Nei distanziometri esiste un oscillatore molto stabile di precisione pari a  $p=10^{-8}$  e  $\lambda=20$  m.

Per determinare le coordinate dei punti indagati lo strumento registra gli angoli di direzione azimutali ( $\theta$ ) e zenitali ( $\varphi$ ) e la distanza inclinata ( $d$ ) per ciascun punto P. Le coordinate del punto sono espresse in un sistema di riferimento polare sferico con origine posta nel centro strumentale. Per documentare la realtà circostante, la misura viene ripetuta secondo un passo angolare (sia orizzontale che verticale) in funzione della risoluzione desiderata.

Di seguito vengono riportate le equazioni per determinare le coordinate del punto e il sistema di coordinate  $X_s, Y_s$  e  $Z_s$  intrinseco allo strumento (*ICS- Instrumental Coordinate System*) (Figura 3-7).

$$\begin{aligned}
 X_p &= X_s + d \cdot \sin\varphi \cdot \sin\theta \\
 Y_p &= Y_s + d \cdot \sin\varphi \cdot \cos\theta \\
 Z_p &= Z_s + h_s - h_p + d \cdot \cos\varphi
 \end{aligned}$$

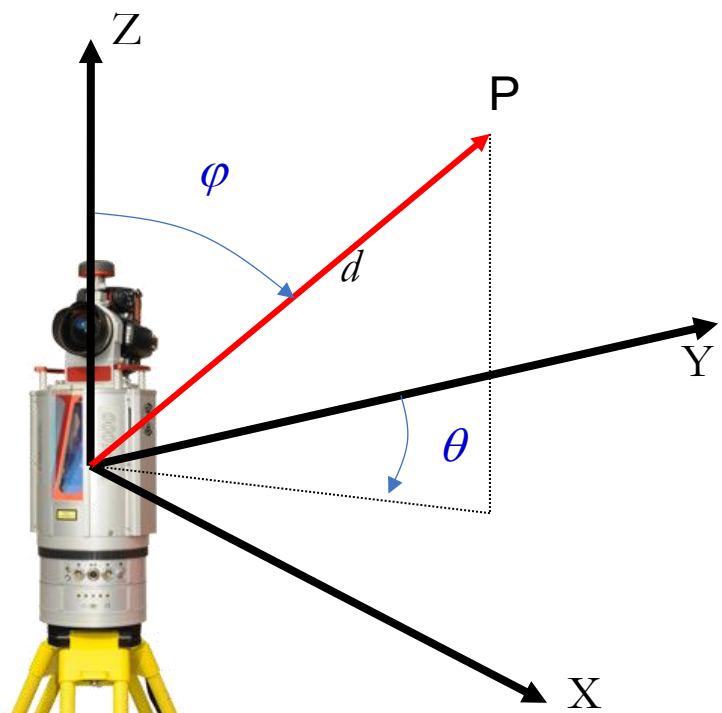


Figura 3-7 Laser scanner Riegl VZ1000 e sistema di coordinate interno allo strumento (ICS)

La precisione dei laser scanner distanziometrici  $\sigma$  è così determinabile:

$$\sigma_x = \sqrt{(\text{sen}\alpha \cdot \cos\beta)^2 \cdot \sigma_d^2 + (d \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta)^2 \cdot \sigma_\alpha^2 + (-d \cdot \text{sen}\alpha \cdot \text{sen}\beta)^2 \cdot \sigma_\beta^2}$$

$$\sigma_y = \sqrt{(\text{sen}\alpha \cdot \text{sen}\beta)^2 \cdot \sigma_d^2 + (d \cdot \cos\alpha \cdot \text{sen}\beta)^2 \cdot \sigma_\alpha^2 + (d \cdot \text{sen}\alpha \cdot \cos\beta)^2 \cdot \sigma_\beta^2}$$

$$\sigma_z = \sqrt{\cos^2\alpha \cdot \sigma_d^2 + (-d \cdot \text{sen}\alpha)^2 \cdot \sigma_\alpha^2}$$

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$$

I distanziometri a impulsi rispetto ai distanziometri a misura di fase hanno i seguenti vantaggi:

- maggiore portata (fino a qualche km): l'impulso ha un'intensità istantanea maggiore rispetto al segnale continuo di un EDM a misura di fase: a parità di energia emessa, pertanto, si propaga nell'atmosfera a distanze maggiori;
- possibilità di misurare senza riflettore su distanze brevi (fino a massimo di un Km) poiché l'intensità istantanea della luce è maggiore e anche il debole riflesso di tipo diffuso dato da superfici opache (muratura, intonaco, acciaio, pietra, ecc.) viene percepito dallo strumento, che riesce a determinare l'istante in cui il segnale di ritorno arriva e a misurare la distanza;
- possibilità di effettuare il rilevamento di punti inaccessibili da una sola stazione e con un solo operatore (non è necessario avere un collaboratore che va a posizionare il prisma come nel rilievo celerimetrico, rilievo delle sezioni trasversali di gallerie, ecc.);
- la qualità di misura del range non è fortemente influenzata dai fattori ambientali (temperatura, pressione, umidità, ecc.).

Tali vantaggi hanno spinto gli EDM a impulsi a diventare sempre più popolari e sostituire progressivamente gli EDM a misura di fase.

L'unico svantaggio è l'accuratezza, che è leggermente inferiore (5-25 mm + 1-2 ppm) rispetto ai distanziometri a misura di fase oltre ad essere meno veloci in fase di acquisizione. I distanziometri a misura di fase sono, infatti, più veloci (fino a 1000000 punti/s) e più precisi (1-2 mm + 1-2 ppm).

Per quanto riguarda, invece, i laser scanner a differenza di fase la determinazione della distanza risulta essere più precisa rispetto a quella dei laser a impulsi (TOF), ma necessita di una maggiore intensità del segnale di ritorno e ciò ne limita la portata (fino a 2 mt) (Figura 3-8).

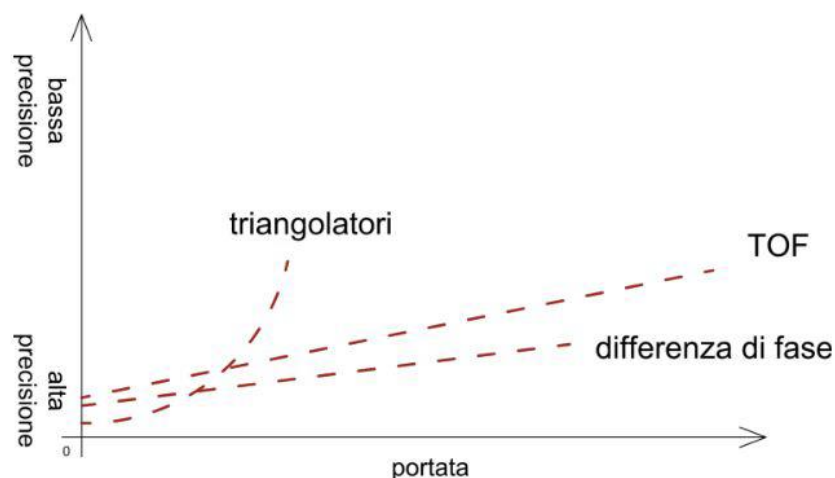


Figura 3-8 Schematizzazione della variazione della precisione della misura in funzione della portata nei laser scanner. (Fonte, <https://www.ingenio-web.it/articoli/guida-alla-comprensione-e-all-uso-dei-sistemi-laser-scanner-terrestri-o-tls/>).

Dal punto di vista applicativo è possibile ordinare le tecniche di rilievo appena esaminate in base alla precisione e al range (Figura 3-9):

- corta portata (short range): portata fino a 1-2 metri; i *triangulation scanners* (precisioni sub-millimetriche);
- media portata (medium range): 200-300 metri; i *ranging scanner* con prevalenza dei distanziometri a misura di fase (precisioni nella misura della distanza millimetriche);
- grande portata (long range): fino a 5-8 km; *distanziometri a impulsi (TOF)* (precisioni 3-5 mm). Vengono per questo impiegati per il monitoraggio e indagini a livello territoriale.

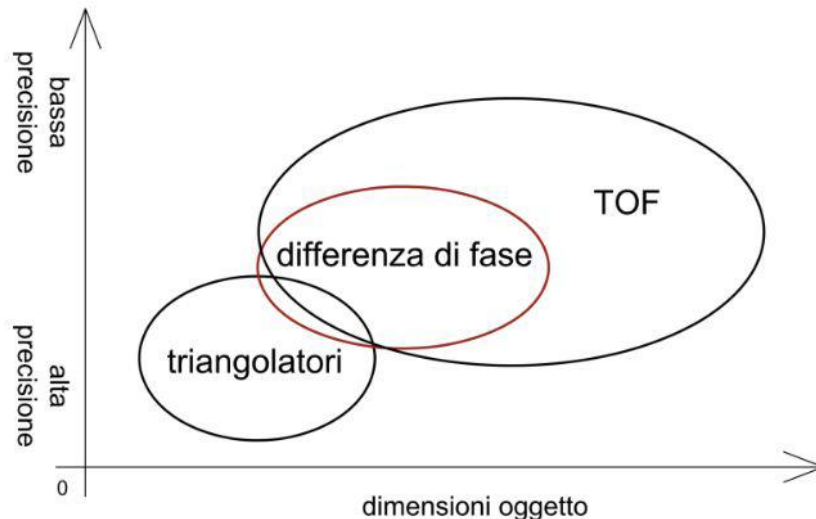


Figura 3-9 Schematizzazione della variazione della precisione della misura in funzione delle dimensioni dell'oggetto da rilevare. (Fonte, <https://www.ingenio-web.it/articoli/guida-alla-comprensione-e-all-uso-dei-sistemi-laser-scanner-terrestri-o-tls/>).

I ranger scanner si differenziano a seconda delle condizioni operative in due categorie: laser scanner terrestri (TLS) o statici e laser scanner aerei (ALS) o dinamici (mobile). I laser scanner terrestri sono impiegati sia in ambienti interni che esterni e hanno diversi campi di applicazione: architettura, ingegneria, edilizia, pubblica sicurezza e indagini forensi, rilievi in ambito geo-topografico di elevata precisione, ecc. Le procedure classiche di rilievi statici di alta precisione richiedono in genere molto tempo, e non sono convenienti in termini di tempistica operativa, e quindi di costi, e via via il loro uso rimarrà appannaggio di progetti speciali in ambito ingegneristico (urbano e territoriale), o dei beni culturali in casi speciali di replica di alta precisione di un manufatto complesso (architettonico), ma anche di piccole porzioni di decorazioni 3D come nelle architetture di vari periodi storici.

Il laser scanner terrestre rileva la realtà circostante mediante l'invio e la ricezione del segnale laser in tutte le direzioni attraverso la rotazione sull'asse verticale e la contemporanea rotazione sull'asse orizzontale.

I laser scanner *aerei* (ALS), invece, sono strumenti in movimento durante la fase di acquisizione delle coordinate di un punto. Devono pertanto essere dotati, oltre che di uno strumento LiDAR, di un ricevitore GNSS e di una piattaforma inerziale. La conoscenza delle posizioni relative tra centri strumentali consente di identificare non solo il posizionamento del centro dello strumento di scansione ma anche l'effettiva direzione del raggio di misura, il tutto secondo il sistema di riferimento geocentrico WGS84. Accoppiati con sensori GNSS/INS vengono utilizzati per misurare con precisione la posizione e l'orientamento del sistema per la generazione di modelli digitali di superficie (DSM), la modellazione di città, le applicazioni forestali, il monitoraggio strutturale e il rilevamento dei



cambiamenti, ecc. [Remondino, F., Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning, Remote Sensing, 2011, 3(6), pp. 1104-1138].

### 3.1.2 Caratteristiche dei laser scanner

Esistono varie tipologie di laser scanner terrestri in commercio che implicano differenze nell'accuratezza di misura, nella distanza, nella modalità di acquisizione e nella risoluzione della nuvola di punti. In funzione delle specifiche necessità di utilizzo la scelta dello strumento viene effettuata sulla base di diverse caratteristiche, quali:

- accuratezza in genere millimetrica - centimetrica (0,5 mm- 5 cm);
- velocità di acquisizione: numero di punti al secondo che vengono acquisiti;
- range di misura o portata (0,5 m – 6000 m): distanza massima misurabile con affidabilità dal sensore. Essa dipende dalle caratteristiche del segnale emesso (raggio laser nelle lunghezze d'onda dell'infrarosso o del colore verde), dal mezzo nel quale si propaga, dalla direzione con cui raggio laser colpisce la superficie dell'oggetto (angolo di incidenza), dalle condizioni di umidità della superficie e soprattutto dal materiale che costituisce l'oggetto in particolare le sue caratteristiche di riflettività e rugosità.
- lunghezza d'onda del segnale in base alle possibili sorgenti di rumore esterno (luce solare, umidità) e delle caratteristiche di riflettività delle superfici esterne;
- campo visivo dello strumento;
- dotazione di camere digitali interne o esterne in grado di acquisire e correlare l'informazione del colore con dato geometrico della nuvola di punti;
- facilità di trasporto;
- tipo di alimentazione;
- qualità del software di acquisizione.

Per quanto riguarda l'*accuratezza* essa indica la proprietà fondamentale di ottenere misure corrispondenti al valore reale e si distingue [11]:

- *l'accuratezza angolare*: legata alle caratteristiche costruttive dello strumento e, in particolare, alla qualità delle componenti meccaniche (specchi deflettori o di prismi) adottate nella deflessione del raggio laser.
- *accuratezza nella misura delle distanze*: all'aumentare di questo parametro aumenta la durata della scansione; nei *laser scanner distanziometrici* varia in modo lineare rispetto alla distanza mentre per i *scanner triangolatori* diminuisce con il quadrato della distanza.

Il *campo visivo* rappresenta, invece, l'ampiezza dello spazio in orizzontale e in verticale rilevabile con una singola scansione da parte dello strumento; tale grandezza viene espressa come un valore angolare relativo al piano verticale ed uno al piano orizzontale. Dal punto di vista del *campo visivo* i laser scanner possono essere raggruppati in tre tipologie [11:]:

- i *Camera Scanner* caratterizzati da un limitato campo visivo sia sul piano orizzontale che verticale utilizzati per rilievi ambientali o scansioni di superfici situate a lunga distanza;
- i *Panorama Scanner* con campo visivo quasi sferico, limitato solamente dalla base dello strumento, impiegati per scansioni di interni di edifici e di gallerie;
- gli *scanner di tipo ibrido* che adottano una soluzione intermedia ovvero possono compiere rotazioni complete solamente attorno ad uno degli assi, mentre la rotazione attorno al

secondo asse è limitata entro i 60°-70° (in parte dovuto al cono d'ombra generato dal treppiede di supporto).

I laser scanner possono essere dotati di *sensore digitale* che può essere interna allo scanner, esterna ma integrata al sistema laser scanner, oppure può essere una fotocamera esterna utilizzata direttamente dall'operatore. Nel caso di fotocamera interna l'immagine digitale viene acquisita contemporaneamente alla scansione ma presenta generalmente una qualità piuttosto bassa a causa della limitatezza del sensore RGB interno; tuttavia, consente di associare ad ogni punto acquisito la radiometria rilevata sull'area di impatto del raggio di misura. Alcuni produttori di laser scanner, invece, adottano la soluzione di fotocamera innestata solidamente alla testa dello scanner della quale sono noti i parametri interni e la posizione, e distanza focale e puntamento vengono controllati dallo stesso software di interfaccia dello strumento [11].

Altro aspetto fondamentale nella scelta dello strumento è la *facilità di trasporto*; in particolare, nel caso occorra realizzare scansioni di zone difficilmente raggiungibili. Le principali caratteristiche legate alla praticità e semplicità di trasporto dello strumento da tener conto, oltre al peso e le dimensioni, sono la resistenza ad urti e vibrazioni che possono verificarsi durante il trasporto, la qualità della custodia fornita e del corredo dell'apparecchiatura, oltre a possibili dispositivi di protezione dello strumento quando viene posta in stazione nella posizione di presa.

Infine, di fondamentale importanza è il *software di acquisizione e archiviazione dati*; l'utilizzo dello strumento necessita di un'interfaccia software installata su pc. La sua qualità è legata alle caratteristiche di intuitività dell'interfaccia grafica e della scelta delle funzioni, nonché della serie di controlli che permette di effettuare sull'hardware ovvero la possibilità di:

- avere una preview delle scansioni e una stima del tempo di scansione;
- registrazione delle scansioni con riconoscimento automatico di segnali ad alta riflettività o di forma nota detti *target* [11].

### 3.2 Pianificazione del rilievo con laser scanner

Il progetto di una campagna di acquisizione laser terrestre può essere effettuato considerando prima di tutto il tipo di laser utilizzato in funzione della tipologia di risultato finale che si vuole ottenere (precisioni, portata, campo visivo, risoluzione, ecc.); è bene stabilire a priori quale sia il risultato che si vuole raggiungere da un rilevamento con laser scanner.

Il laser scanner terrestre acquisisce in modo automatico milioni di punti in modo del tutto casuale. All'operatore è permessa la sola scelta della porzione di oggetto o territorio che desidera acquisire e la densità dei punti che vuole ottenere dalla scansione. Impostati questi valori iniziali l'acquisizione avviene in modo completamente automatico [10]. Tale approccio di rilevamento semplifica e velocizza le operazioni di acquisizioni, rende possibile il rilevamento di geometrie complesse (elementi strutturali, architettonici, impiantistici) e riduce la possibilità di errori o dimenticanze durante l'acquisizione.

La densità dei punti acquisiti con tecnica di rilievo LiDAR non è costante ma è dipendente dalla distanza secondo la seguente formula:

$$m = d \cdot \gamma_{rad}$$

dove  $d$  è la distanza tra il centro di presa dello strumento e il punto scansionato, mentre  $\gamma_{rad}$  è la distanza angolare tra un punto scansionato e quello vicino.

La precisione e la densità di punti possono essere definite secondo due modalità [11]:

- utilizzando la dimensione minima della caratteristica dell'oggetto che si vuole rilevare; l'English Heritage ha infatti introdotto il parametro di qualità  $Q$ , che vale:

$$Q = 1 - \frac{m}{\lambda}$$

dove  $Q$  rappresenta la qualità dei dati, mentre  $m$  è la densità dei punti sull'oggetto e  $\lambda$  è la dimensione minima. Con questo parametro è possibile quindi indicare a quale livello l'oggetto è stato scannerizzato: ad esempio un valore negativo di  $Q$  indica una densità di punti insoddisfacente a rappresentarlo in dettaglio.

- basandosi sulla scala del rilievo, secondo la Tabella 3-1 di seguito riportata.

| SCALA | EFFETTIVA DENSITA' DEI PUNTI [mm] | PRECISIONE [mm] | USI  |
|-------|-----------------------------------|-----------------|--|
| 1:10  | 2.0                               | 2.0             | Piccoli dettagli/oggetti (sino a 5 m x 5 m)  |
| 1:20  | 4.0                               | 4.0             | Grandi dettagli/oggetti (sino a 10 m x 10 m) |
| 1:50  | 15.0                              | 15.0            | Piccole strutture (sino a 20 m x 30 m)       |
| 1:100 | 25.0                              | 25.0            | Grandi strutture (sino a 40 m x 60 m)        |

Tabella 3-1 Precisione e usi del laser scanner in funzione della scala di rappresentazione.

Inoltre, occorre valutare la tipologia di oggetto che si vuole rilevare (materiale) e l'ambiente nel quale si trova l'oggetto (accessibilità); dimensione e complessità geometrica (forma) dell'oggetto oltre ai luoghi dove stazionare con lo strumento laser vincolano la scelta dello strumento da utilizzare per il rilevamento (nel caso ad esempio di una zona di frana si dovrà tenere conto non solo la dimensione dell'oggetto da rilevare ma anche dove posizionare lo strumento laser e quindi la portata necessaria, o la necessità di stazionare per tempi brevi in luoghi pericolosi quali impianti industriali o edifici architettonici danneggiati vincoleranno i tempi di acquisizione dello strumento).

Una volta definiti i precedenti aspetti si può procedere alla pianificazione del rilievo LiDAR tenendo conto di:

- eseguire scansioni laser da più posizioni: la qualità dei punti 3D rilevati dal laser scanner dipende dalla distanza e dall'angolo d'acquisizione ovvero l'angolo con cui il raggio laser incide sulla superficie dell'oggetto da rilevare;
- posizionare lo scanner in modo da garantire la maggior visibilità dell'area da rilevare e riducendo i fenomeni di ombre dovuti alla presenza di ostacoli. Per essere sicuri di ciò è utile "preregistrare" le scansioni in loco, ovvero "avvicinare manualmente" o pre-allineare una scansione all'altra utilizzando dei punti comuni nelle zone di sovrapposizione delle scansioni;
- posizionamento corretto dei target all'interno dell'area rilevata o sulla superficie dell'oggetto da rilevare e identificazione topografica delle loro coordinate in modo tale da garantire la

georeferenziazione dei dati laser in un sistema di coordinate unico o consentire la loro unione;

- immagini digitali da camere digitali qualora sia necessario avere l'informazione di colore sulla geometria 3D;
- garantire un'omogeneità geometrica del rilievo sia in termini di accuratezza nella misura della distanza sia di densità della nuvola di punti 3D. Per quanto riguarda l'accuratezza geometrica della misura varia al variare della distanza del sensore dall'oggetto pertanto occorre posizionare lo scanner ad una distanza mediamente costante rispetto alla parte di interesse da rilevare. Per quanto riguarda invece la densità di punti 3D con cui si vuole descrivere l'oggetto da rilevare, invece, dipende dal passo di scansione; tale passo viene scelto sulla base della distanza media dell'oggetto dallo scanner in modo da ottenere un rilievo costituito da scansioni quanto più possibile con risoluzioni omogenee.

### 3.3 Operazioni di rilievo

Per quanto riguarda le operazioni di rilievo è possibile individuare tre fasi successive:

- rilievo di inquadramento;
- rilievo di raffittimento;
- rilievo di dettaglio.

La prima fase prevede la creazione e la misura di una rete topografica, detta *rete di inquadramento*, tramite l'impiego di antenne GPS o GNSS utilizzate come basi periodicamente controllate, o con l'utilizzo di stazioni totali robotizzate in postazioni fisse. La rete è costituita da un numero limitato di punti, detti *vertici*, opportunamente distribuiti. Tali vertici vengono materializzati a terra tramite chiodi in acciaio con rondella in modo da poter essere utilizzati come riferimento per attività di rilievo futuri. Le informazioni riguardanti i vertici utili alla loro identificazione sono inoltre documentate tramite stesura di monografie. In genere, tali punti vengono materializzati a terra in aree distanti dall'area da rilevare e considerate stabili. La costruzione di reti di inquadramento ad alta precisione consente di misurare con maggiore accuratezza gli spostamenti relativi e le deformazioni di qualunque superficie (o masse) in movimento [Blois et al.,2009]. Ciò è possibile grazie al sistema di posizionamento satellitare che permette di ottenere le coordinate dei punti con precisioni centimetriche o millimetriche e quindi, di effettuare valutazioni accurate su spostamenti e variazioni a intervalli temporali prestabiliti.

La seconda fase prevede la realizzazione di una *rete di raffittimento* tramite tecnica RTK (*Real Time Kinematic*) tramite il posizionamento di ricevitori GPS/GNSS muniti di antenne geodetiche multicostellazione. Le antenne GPS/GNSS ricevono il segnale emesso dalla rete dei satelliti orbitanti intorno alla terra e lo utilizzano per calcolare le coordinate dei punti rilevati nel sistema di riferimento globale geocentrico WGS84. Il posizionamento dei punti segue il principio di tipo differenziale, con la base solitamente fissa su un punto di coordinate note, che fornisce le correzioni differenziali necessarie alla determinazione delle coordinate del punto da misurare su cui invece è collocato il rover. Per garantire un collegamento tra le varie stazioni della rete viene realizzata, quindi, una poligonale attraverso l'uso della stazione totale e di prismi circolari montati su treppiedi con la modalità del centramento forzato.

La terza fase, infine, viene eseguita posizionando la stazione totale sul punto di stazione e, orientandola su un vertice di inquadramento, si procede con la collimazione di una serie di punti

materializzati mediante dei *target* posizionati in maniera uniforme sull' elemento di studio e la misurazione delle loro coordinate sferiche legate al sistema GNSS. Pertanto, una volta terminata la procedura di messa in stazione dello strumento, il rilievo dei punti di controllo avviene mediante misure topografiche di dettaglio utilizzando il metodo celerimetrico orientando, cioè, la stazione totale su di un vertice noto nella rete di inquadramento; tale metodo ha come obiettivo principale quello di associare le coordinate dei singoli punti collimati e misurati alla rete di inquadramento generale permettendo quindi di georiferire in un unico sistema di riferimento tutte le misure effettuate durante il rilievo. Procedendo nell'ordine aumenta il numero dei punti rilevati e diminuisce l'accuratezza fino a un certo valore compatibile con gli obiettivi del rilievo. In generale, un rilievo di un manufatto viene eseguito, con due obiettivi principali. Il primo è tecnologico e strutturale, mentre il secondo è un'analisi conoscitiva dello stato fessurativo e del livello di degrado.

### 3.4 Trattamento dei dati laser scanner

Una volta acquisiti i dati laser scanner è necessario effettuare delle operazioni di trattamento dai dati per ottenere, da una o più scansioni (point cloud) acquisite, un prodotto finale che possa essere utile all'utente finale per l'estrazioni di informazioni di interesse quali modello 3D a colori, immagine solida, ortofoto di precisione, ecc.. L'insieme di queste operazioni può essere rappresentato dalle seguenti fasi: acquisizione e controllo dati, trattamento preliminare e creazione del prodotto finale (Figura 6-10).



Figura 3-10 Organigramma del trattamento dati laser scanner [3.X].

La fase iniziale della procedura di trattamento del dato laser scanner è l'acquisizione dei dati. La qualità del risultato è funzione di questa prima fase, l'unica realizzata direttamente sul luogo del rilevamento. È quindi raccomandabile eseguire controlli in tempo reale dei dati acquisiti. Ogni scansione possiede un proprio sistema di riferimento che generalmente coincide con il centro dello strumento. Durante l'acquisizione viene generata una nuvola di punti per ogni scansione: la nuvola è limitata dalle dimensioni del campo visivo dello strumento e dalle parti non visibili dell'oggetto rilevato.

La seconda fase, trattamento preliminare del dato, comprende tutte le operazioni che vengono effettuate direttamente sulla nuvola di punti per la creazione di un modello 3D completo dell'oggetto sotto forma di nuvola di punti priva di errori di acquisizione ed espresso in un unico sistema di riferimento. Questa fase comprende le procedure di:

- registrazione delle scansioni: tale procedura consente di allineare le singole scansioni in un unico sistema di coordinate locale definito mediante operazioni topografiche; essa può essere eseguita mediante algoritmi di surface matching dove due scansioni adiacenti devono comprendere un numero minimo di punti in comune (generalmente si ricorre ad una sovrapposizione del 30%). In particolare, l'algoritmo ICP (Iterative Closest Point) allinea le parti comuni di scansioni adiacenti attraverso la minimizzazione della distanza tra esse.
- georeferenziazione: consente l'allineamento delle scansioni in un sistema di riferimento globale tramite una rototraslazione rigida ovvero senza variazione di scala; ciò è necessario per avere il corretto posizionamento nel sistema di coordinate scelto.
- filtratura del dato: rimozione di outliers e gross errors;
- pulitura del dato: eliminazione del rumore sempre presente nelle acquisizioni laser dovuto principalmente alla divergenza del fascio laser;
- unione: unire le singole point clouds in un'unica nuvola di punti.
- sottocampionamento: riduzione automatica del dato per una più facile gestione in funzione del suo utilizzo;
- colorazione delle point cloud attraverso l'integrazione tra immagini digitali ad alta risoluzione ed il dato laser scanner.

Il risultato di queste operazioni è una nuvola di punti priva di errori e rumore e che rappresenta il punto di partenza corretto per la creazione di qualsiasi prodotto rivolto all'utilizzatore finale dei dati. Esempi di possibili prodotti digitali sono il modello 3D a colori, l'ortofoto di precisione e l'immagine solida [10].



Figura 3-11 Esempio di rilievo eseguito con tecnica laser scanner (terrestre + UAV) di un viadotto stradale; a sinistra il manufatto con il laser scanner terrestre VZ400i RIEGL a destra il manufatto e il drone utilizzato (Fonte, ConsulCAD S.r.l.).



Figura 3-12 Esempio di nuvola di punti ottenuta di un viadotto stradale seguendo la procedura di elaborazione dati all'interno del software RiSCAN PRO (Fonte, ConsulCAD S.r.l.).

### 3.5 Stazione Totale

Una *stazione totale* è uno strumento utilizzato per rilievi topografici per applicazioni civili (monitoraggio di strutture e infrastrutture) formato principalmente da un teodolite elettronico per la misura di angoli orizzontali e verticali (Figura 3-13) incorporato nel cannocchiale e un distanziometro elettro-ottico (EDM a impulsi) per la misura di distanze inclinate o ridotte.

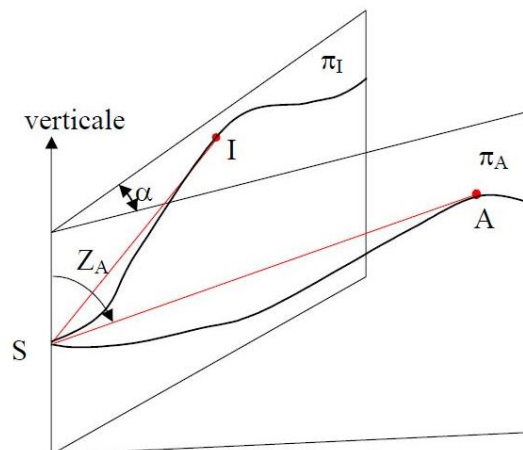


Figura 3-13 Misura di angoli orizzontali e verticali con stazione totale.

Per eseguire le misure, una stazione totale deve essere messa in stazione sulla verticale del punto di stazione materializzato a terra individuato da contrassegno permanente detto *marker* o *centrino*. La messa in stazione consiste nella verticalizzazione dell'asse principale dello strumento tramite la livella torica posta sulla bassetta e nell'allineamento dello stesso asse con la verticale del punto di stazione con le viti calanti poste al di sotto della bassetta.

Le stazioni totali offrono notevoli vantaggi rispetto agli strumenti di misura tradizionali in termini di affidabilità dei dati e riduzione degli errori umani. Inoltre, le stazioni totali moderne (Figura 3-14) sono dotate di:

- un display integrato per la visualizzazione in tempo reale delle misure di distanze e angoli da parte dell'operatore;
- software di elaborazione dati osservati e memoria integrata per memorizzare direttamente i dati e le misurazioni digitalmente; ciò consente di registrare informazioni direttamente sul campo e di trasferirle successivamente su un computer per l'elaborazione tramite software dedicati.



Figura 3-14 Esempio di Stazione Totale (Leica TS60).

Tuttavia, le stazioni totali pur essendo dispositivi capaci di ottenere precisioni millimetriche o sub-centimetriche anche da lunghe distanze fino ad alcuni km, risultano essere costose, richiedono formazione e competenze specifiche per essere utilizzate in modo corretto (problematiche operative quali necessità di avere sempre una buona intervisibilità tra il punto di stazione e il punto da misurare, accessibilità del sito, disponibilità dei dati, ecc.) e sono sensibili alle condizioni meteorologiche (fenomeni di rifrazione atmosferica, pressione, umidità, ecc.) e di illuminazione che possono influenzare le misurazioni laser [Bertacchini et al.,2011].

Il rilievo con stazione totale può essere di precisione o celerimetrico. Nel primo caso le misure sono ridondanti, mentre nel secondo caso i punti vengono solamente collimati in posizione «primaria» senza coniugata. Durante la misura di angoli e distanze con stazione totale vengono usate le coordinate dei vertici di stazione (S) e di orientamento (O) note dalla compensazione della rete geodetica con i minimi quadrati (Figura 3-15).



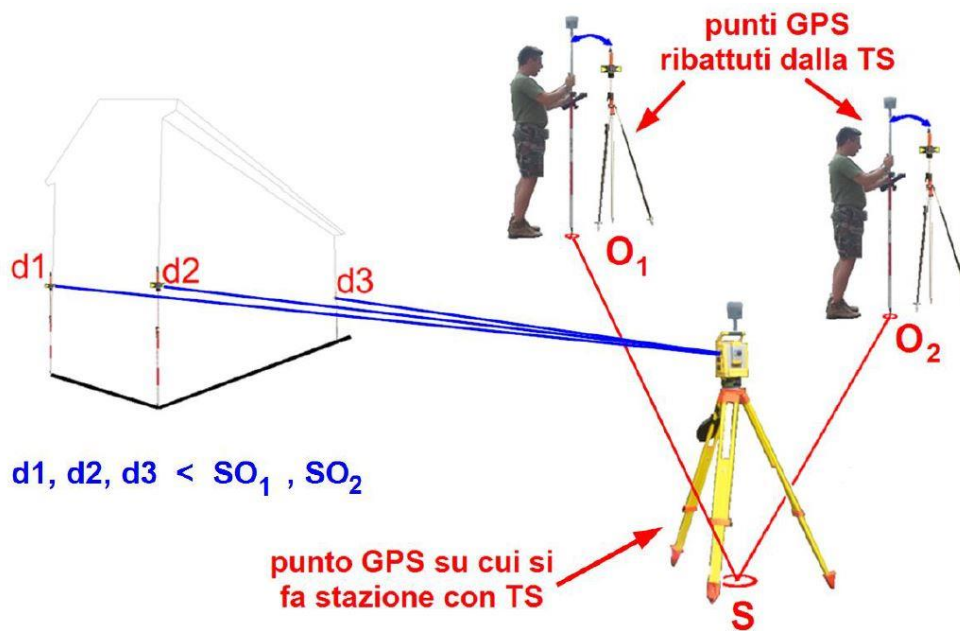


Figura 3-15 Misura di distanze e angoli con stazione totale a

Prima di eseguire il rilievo occorre materializzare sul terreno il sistema di riferimento prescelto. La materializzazione del datum avviene attraverso l'istituzione di una rete geodetica di inquadramento che "ingabbia" l'infrastruttura. I vertici della rete di inquadramento si possono dividere in *vertici di stazione* in genere scelti in prossimità di particolari notevoli come imbocchi e finestre laterali delle gallerie, viadotti, ponti, ecc. e *vertici di orientamento* per le misure angolari. Una volta eseguita la rete d'inquadramento, è possibile effettuare delle misurazioni o avviare una registrazione automatica delle misure. La rete geodetica di inquadramento può essere realizzata con metodi topografici tradizionale (distanziometro, teodolite e stazione totale) anche se è ormai consolidata la tecnica GNSS per la maggiore precisione, velocità operativa. Tuttavia, la sua applicazione dipende dalla percentuale di punti direttamente tracciabili senza temere ostacoli di visibilità delle costellazioni satellitari.

Di seguito vengono riportate le equazioni per determinare le coordinate di un punto P ( $X_P, Y_P, Z_P$ ) tramite la misura di distanze e angoli tramite stazione totale.

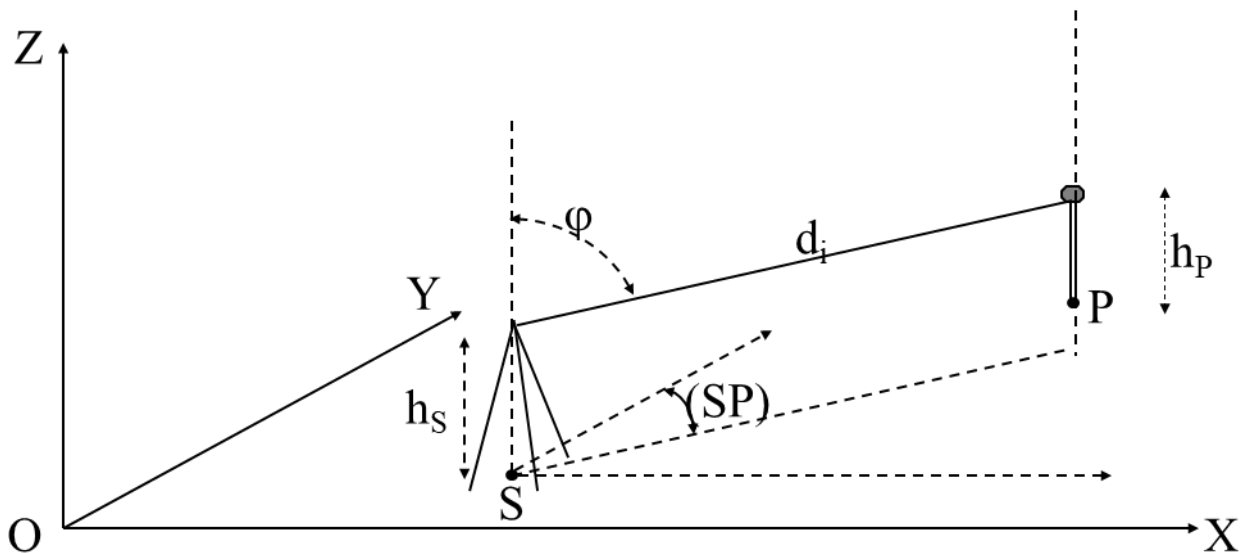
$$X_P = X_S + d_i \cdot \sin\varphi \cdot \sin(SP)$$

$$Y_P = Y_S + d_i \cdot \sin\varphi \cdot \cos(SP)$$

$$Z_P = Z_S + h_s - h_p + d_i \cdot \cos\varphi$$

Dove:

- direzione azimutale (SP);
- angolo zenitale  $\varphi$ ;
- distanza inclinata  $d_i$ ;
- altezza strumentale  $h_s$ ;
- altezza del prisma  $h_p$ .



Nel caso del seguente lavoro di tesi la stazione è stata utilizzata insieme a un prisma circolare, una volta orientata verso punti noti ovvero i vertici della rete di inquadramento, per calcolare le coordinate dei punti di una rete di appoggio materializzati sulla strada all'interno del sottopasso. Sono state fatte misure ridondanti di controllo ed è stato realizzato uno schema di poligonale. Successivamente, posizionando la stazione totale sui vertici della poligonale creata, è stata impiegata per determinare le coordinate di alcuni marker (target artificiali retroriflettenti) posizionati all'interno del tunnel impiegati poi per la post-elaborazione del dato acquisito con laser scanner come descritto nel dettaglio nel sesto capitolo.

### 3.6 Tecniche di rilievo MMS per gallerie

L'attuale sistema di sorveglianza delle gallerie si basa su ispezioni visive, normalmente condotte a piedi o su carrello in regime di interruzione, parziale o totale, della circolazione. Questo da un lato comporta una maggiore attenzione nei confronti dell'opera, dall'altro crea una situazione di disagio, per gli utenti che sono esclusi dall'utilizzo dell'infrastruttura, per gli operatori, con rischio elevato per la propria sicurezza, ed infine per i gestori, che devono affrontare un elevato dispendio di risorse. Le tecnologie più recenti consentono il rilevamento e l'ispezione di gallerie e infrastrutture con i sistemi MMS (Mobile Mapping System) sia da veicoli attrezzati MMV (Mobile Mapping Vehicle) sia con droni UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Tali sistemi possono funzionare a diverse velocità, a seconda della precisione e dell'accuratezza che si vuole ottenere e in base alle finalità ingegneristiche e gestionali. Il Mobile Mapping può contare su grandi vantaggi in termini di velocità, efficienza e sicurezza, riducendo i tempi di stazionamento e spostando l'attività in back office.

Gli UAV comunemente detti droni sono veicoli senza pilota impiegati per rilevamenti in gallerie con una gabbia di protezione per proteggerli da eventuali urti. Necessitano di sensori di posizione e assetto (GNSS e IMU), di camere digitali, termocamere e altri sensori.

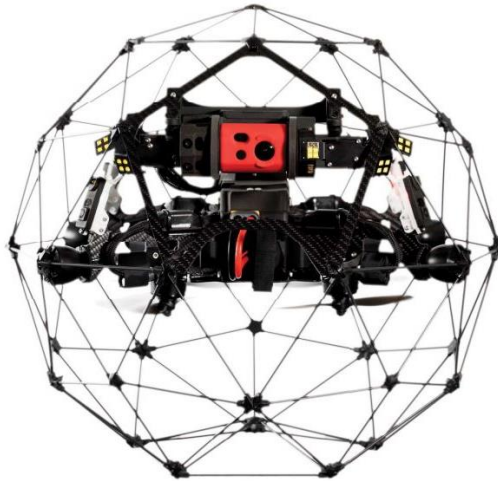


Figura 3-16 Esempio di drone per spazi confinati con gabbia di protezione (elios2)

Un sistema di rilevamento mobile MMV, invece, è un veicolo che permette di eseguire e integrare misure provenienti da differenti sensori quali GNSS, IMU, camere digitali, LiDAR odometri, ecc. I sistemi MMV infatti vengono utilizzati per rilievi ad alto rendimento per il catasto delle infrastrutture (obbligo di legge per gli enti proprietari), per la manutenzione e la sicurezza delle strade (misura delle grandezze geometriche della strada, censimento della segnaletica, stato del manto stradale, ecc.). Tali sistemi consentono una rapida mappatura dell'asset.

In questo scenario, ETS S.r.l. ha sviluppato un sistema Mobile Mapping Vehicle proprietario: ARCHITA, che in un unico passaggio acquisisce dati georeferenziati da diversi sensori installati su un veicolo in movimento, e, mediante l'impiego di opportune tecniche di post-processamento, permette di ottenere un numero consistente di informazioni in tempo reale in 3D rappresentative dello stato di fatto della galleria in esame.



Figura 3-17 Esempio di MMV ARCHITA per gallerie ferroviarie (a sinistra) e stradali (a destra) [21].

ARCHITA è un sistema multidimensionale ideale per il rilievo di infrastrutture lineari composto da sensori di rilievo quali [21]:

- laser scanner (Leica Pegasus Two) per acquisire una nuvola di punti 3D;
- telecamere lineari per scattare foto ad alta risoluzione del rivestimento della galleria, rilevando i componenti e le loro condizioni;
- telecamere termiche per rilevare difetti sul rivestimento;
- georadar (GPR - Ground Penetrating Radar) per rilevare lo spessore della massicciata, le condizioni e l'umidità, lo spessore del rivestimento e del vuoto tra il suolo e il rivestimento.

- sensori di posizionamento (2 antenne GPS (Global Positioning System), una piattaforma inerziale (IMU - Inertial Measurement Unit) e contachilometri).

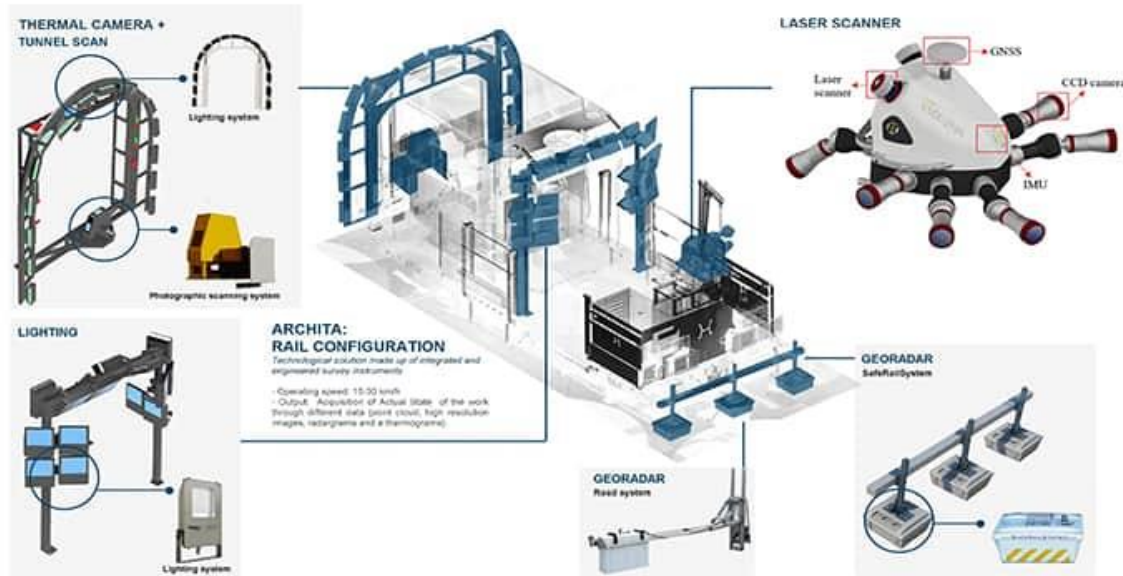


Figura 3-18 Configurazione di ARCHITA [21].

Il sistema di rilievo mobile mapping multidimensionale (ARCHITA) consente di raccogliere dati sulla geometria e sulle condizioni strutturali e funzionali della galleria grazie alla nuvola di punti e immagini digitali HD e termiche [21].

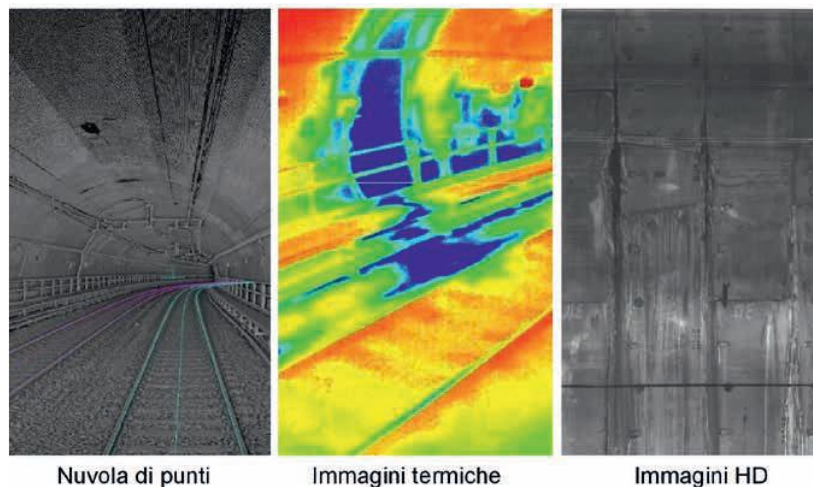


Figura 3-19 Informazioni simultanee e integrate acquisite con ARCHITA. Nuvola di punti (a sinistra), immagini provenienti dal sistema di acquisizione termografico (al centro) e fotografico (a destra) [21].

L'acquisizione dei dati avviene con limitato disturbo della circolazione del traffico, in quanto il sistema permette di rilevare l'intera galleria a velocità sostenuta (15-30 km/h) con un unico passaggio. La ricostruzione di geometria e stato di consistenza della galleria avviene con dati più oggettivi, chiari e ripetibili. Questi presupposti sono fondamentali per la fase di rilievo e ispezione, spesso all'apice nel processo MIRET (*Management and Identification of the Risk for Existing Tunnels*), in quanto ripetibile con ciclicità, o in fase di post-operam, per raccogliere e analizzare i dati in diversi istanti temporali. Solo in questo modo l'ispezione riesce a diventare uno strumento di monitoraggio dello stato dell'opera d'arte per attuarne un'analisi predittiva e oggettiva.

La metodologia impiegata da ETS S.r.l. si basa su un processo e una tecnologia per la digitalizzazione, la progettazione e la gestione, digitale e integrata, di gallerie esistenti. MIRET combina innovativi sistemi di rilievo, analisi geotecniche e strutturali, diagnostica, intelligenza artificiale e analisi di priorità. Il risultato è un sistema immediato e sostenibile per la pianificazione, la progettazione e la manutenzione delle gallerie.



Figura 3-20 Il puzzle-chart della metodologia e delle milestone del MIRET [21].

Attraverso la combinazione di laser scanner e georadar di ARCHITA è possibile creare un modello 3D della galleria e associare le relative informazioni per impostare il gemello digitale in BIM, con le caratteristiche fisiche e funzionali dell'opera. La ricostruzione geometrica è utilizzata come strumento di supporto alle milestone della metodologia MIRET, ma anche come strumento di verifica a sé stante [21].

## 4. SCAN-TO-BIM

### 4.1 Definizione SCAN-TO-BIM

Con il termine SCAN-TO-BIM si indica il processo di creazione di modelli digitali BIM di opere esistenti (edifici, infrastrutture, ecc.) a partire dai dati acquisiti con tecniche di rilievo non invasive quali laser scanner 3D, Structure for Motion e la fotogrammetria ad alta definizione [S13].

Tale processo di rilievo digitale, grazie all'ausilio di specifici software, genera una nuvola di punti molto dettagliata. La qualità e la quantità delle scansioni acquisite e le condizioni ambientali al momento dell'acquisizione influenzano questo processo. La nuvola di punti (o point cloud) ottenuta può essere importata in un software di modellazione BIM ed essere utilizzata per ottenere modelli digitali dell'esistente [S13]; l'acquisizione tramite camera digitale di immagini ad alta risoluzione ed eventuale documentazione esistente, consente di ricostruire modelli 3D parametrici dell'opera e facilita la sua gestione visiva ed interattiva.

Le fasi fondamentali del processo SCAN-TO-BIM sono [S13]:

- rilievo con laser scanner 3D del costruito;
- elaborazione e trattamento dei dati;
- modellazione BIM.

Il processo SCAN-TO-BIM ha inizio con il rilievo 3D; esso è un momento di grande rilevanza poiché la bontà della misurazione influenza lo sviluppo delle successive fasi del lavoro: è la fase conoscitiva indispensabile per conoscere il manufatto e contestualizzarlo [17]. Il rilievo, condotto con strumenti diversi e a scale differenti in base alle condizioni dell'opera, al contesto in cui si trova e al tipo di intervento, rappresenta una fase fondamentale per la restituzione grafica di un'opera oggetto di un processo SCAN-TO-BIM sia essa un edificio, un'infrastruttura o un singolo elemento. Per ottenere un modello digitale che sia il più possibile simile alla realtà si usano oggi strumentazioni altamente tecnologiche ed innovative che garantiscano una precisione, a seconda del caso in esame, centimetrica o millimetrica, come la fotogrammetria e i laser scanner. Il rilievo 3D deve essere svolto sul campo da professionisti dotati di strumenti quali laser scanner 3D e droni in grado di catturare l'intero manufatto o solo una parte di esso.

Una volta acquisiti i dati grezzi sul campo, in funzione del risultato e del livello di dettaglio richiesto, è necessario elaborarli e combinarli in software di editing delle nuvole di punti. Questi software estraggono le geometrie e le informazioni fisiche e funzionali del manufatto dalla scansione della nuvola o delle nuvole di punti utili alla creazione di un modello parametrico funzionale all'intervento e alla gestione [17] attraverso una sorta di "*reverse engineering*" ovvero una modellazione inversa. In questa fase, è opportuno stabilire fin da subito quale sia l'utilizzo finale a cui è destinata la nuvola di punti. A seconda dell'utilizzo previsto, questi tipi di file, che possono raggiungere dimensioni molto grandi, vengono generalmente puliti da eventuali "rumori" di fondo e ridotta la densità dei punti. Inoltre, è possibile sezionare la parte di nuvola di punti di interesse in modo da poterla esportare nei diversi formati standard (.las, .laz, .E57, ecc.) e importarla all'interno del software di BIM Authoring per procedere alle attività di modellazione e implementazione delle necessarie informazioni [Tang et al. 2010, pp. 829-843].

Quest'ultima fase di modellazione non è un processo automatico; la creazione di un modello 3D parte dalle informazioni geometriche e spaziali contenute nella nuvola di punti. Ogni punto all'interno della nuvola ha coordinate puntuali rispetto a un sistema di riferimento comune. Ciò

consente al modello così creato di essere georiferito correttamente nello spazio. Ma il fattore che rende tale tecnica innovativa è rappresentato dal fatto che i nuovi software che utilizzano un approccio SCAN-TO-BIM permettono al progettista di avere a disposizione appositi strumenti in grado di individuare automaticamente all'interno della nuvola di punti superfici facilmente individuabili quali muri, porte, pavimenti, coperture, ecc. Tale metodo sottolinea ancor più l'importanza della fase iniziale di rilievo 3D, la cui buona riuscita consente di avere a disposizione dati precisi e affidabili per impostare la fase di modellazione successiva. In seguito, il modello digitale viene reso intelligente aggiungendo ulteriori informazioni complementari che devono essere inserite e organizzate correttamente in modo che il risultato finale della modellazione BIM sia utile per i diversi campi di applicazione del processo SCAN-TO-BIM, come il restauro, la riqualificazione, i ripristini, il FM attraverso un Digital Twin, ecc. Tale modello è, pertanto, un contenitore in grado di immagazzinare i dati di diversa natura (geometrici, economici, temporali, ecc.) e di rielaborarli al fine di ottenere visualizzazioni e simulazioni [17]. Tali informazioni andranno a formare delle vere e proprie librerie di oggetti, sempre aggiornabili e utili a rappresentare i differenti elementi e tecniche costruttive del patrimonio esistente.

#### 4.2 Perché il SCAN-TO-BIM

Il principale obiettivo del processo Scan-to-BIM è quello di acquisire rapidamente le condizioni reali di un'opera per creare un modello grafico-geometrico digitale dello stato di fatto estremamente dettagliato in tempi brevi. Di conseguenza, questo processo è applicabile alle seguenti fasi [S13]:

- progettazione: il modello BIM aiuta i progettisti a comprendere meglio le condizioni del sito e a prendere decisioni progettuali più accurate;
- costruzione: consente l'identificazione di qualsiasi discrepanza tra il modello BIM "As-built" e il modello BIM "As-designed" dell'opera;
- Facility Management (FM): le operazioni di FM come la gestione degli spazi e delle attrezzature, la pianificazione ed esecuzione di interventi di manutenzione e ripristino possono essere implementate e migliorate utilizzando la visualizzazione 3D e le informazioni esaustive e ben organizzate all'interno del modello BIM.

#### 4.3 Campi di applicazione SCAN-TO-BIM

La tecnica SCAN-TO-BIM è nata per il rilievo, per la riqualificazione e il restauro del patrimonio edilizio esistente, indicata con l'acronimo "H-BIM" (Historic Building Information Modeling). Essa presenta notevoli vantaggi e il suo utilizzo è destinato ad aumentare e a comprendere altri contesti, quali ad esempio l'attività di monitoraggio delle opere infrastrutturali esistenti (ponti, viadotti, gallerie, ecc.). Tali opere, infatti, necessitano di operazioni molto accurate di rilevazione del loro stato di degrado e usura al fine di organizzare opportuni interventi manutentivi. La nuova sfida, infatti, è rappresentata dalla possibilità di poter modellare il patrimonio esistente infrastrutturale e edilizio sul territorio nazionale generando un modello digitale e parametrico contenente informazioni di vario genere.

Nel processo di digitalizzazione delle opere pubbliche gestori e PA durante le fasi di progettazione, realizzazione e di O&M ricorrono sempre più all'uso delle nuove tecnologie usate nell'industria 4.0 particolarmente innovative e strategiche. L'implementazione di tali tecnologie ha come risultato una produzione sempre più, digitalizzata e intelligente. Il processo in atto di digitalizzazione del settore delle costruzioni e la metodologia BIM non servono solo a dare efficienza contribuendo alla riduzione di tempi e costi; offrono anche interessanti opportunità per definire nuovi modelli di

business, offrire nuovi servizi legati allo sfruttamento dei dati e delle conoscenze e far acquisire vantaggi competitivi [16].

L'uso di nuove tecnologie quali Laser scanner e droni, oltre al rilievo preventivo dei luoghi per cui vengono ampiamente impiegate, sono ad esempio, utilizzate nei cantieri per la verifica dell'eseguito e, conseguentemente, l'aggiornamento dei modelli per gli As-built. Tali tecnologie sono in grado di raccogliere grandi masse di dati e di informazioni dal reale che devono poi essere trattate in modo efficiente ed efficace. L'interpretazione dei dati acquisiti può essere automatizzata tramite l'utilizzo di sensoristica IoT e dell'intelligenza artificiale (AI). Secondo Madakam, Ramaswamy e Tripathi l'IoT può essere definita come *“Una rete aperta e completa di oggetti intelligenti che hanno la capacità di auto-organizzarsi, condividere informazioni, dati e risorse, reagire e agire di fronte a situazioni e cambiamenti nell'ambiente”*. L'applicazione di sensori a infrastrutture semplifica l'attività di controllo, sicurezza e manutenzione. La loro integrazione con il BIM è di facile realizzazione: i “Digital Twins” simulano anche i sensori e contribuiscono all'analisi dei dati, alla generazione di informazioni sui modelli di utilizzo e sulle tendenze che possono essere impiegate per ottimizzare la gestione di un bene. L'intelligenza artificiale, invece, nella realtà ancora poco utilizzata, rappresenta una delle nuove frontiere. Nel processo di automazione nella restituzione di modelli grafici (BIM) da nuvole di punti, l'uso dell'intelligenza artificiale (AI), si sta diffondendo. E non solo nella creazione delle geometrie, ma in particolare nell'interpretazione del mondo reale: materiali, degrado, dissesto, ecc.

Si pensi, ad esempio, all'importanza di un rilievo in tal modo assistito per le infrastrutture, così come nel restauro e per gli edifici storici.

Oggi, ad esempio, nell'agricoltura l'uso di immagini da UAV consente all' AI di identificare le piante malate e avviare il processo di intervento. Si sta cercando di fare lo stesso in via sperimentale con le infrastrutture, in particolare i ponti, i viadotti e le gallerie nell' individuazione di crepe o fessurazioni esistenti. L'acquisizione e l'interpretazione di dati, il loro collegamento ad oggetti “neutri” di una libreria BIM, da specializzare in funzione dei rilievi sui luoghi, sono una frontiera da utilizzare sempre più per velocizzare e perfezionare la creazione del modello di Asset o di rilievo dell'esistente iniziale, fondamentale per l'innescio di ogni processo successivo. Così come per velocizzare e semplificare la redazione degli As-built, rilevando il risultato delle lavorazioni eseguite e affidando alla macchina le operazioni di aggiornamento del modello di partenza. Anche se ci sono ancora molti passi da fare, la creazione e l'uso di modelli AI e ML (Machine Learning) possono in parte automatizzare lo SCAN-TO-BIM sempre più utilizzato non solo nelle fasi di progettazione e di esercizio ma anche in fase di esecuzione. Ad esempio, viene utilizzata per l'analisi dei dati provenienti dal cantiere (immagini, sensori, ecc.) e per una loro interpretazione al fine di ottenere risposte immediate sulle azioni da intraprendere. Potrebbe, quindi, consentire il monitoraggio automatico dell'avanzamento dei lavori in un cantiere tramite le soluzioni di IA quali:

- sistemi di ispezione, che consentono agli ispettori di accedere ai dati prima, durante e dopo il processo di ispezione e l'accesso alla funzionalità di registrazione per raccogliere i dati del sito;
- sistemi di controllo, che consentono il controllo della sicurezza, del traffico dell'infrastruttura, dell'utilizzo delle risorse e dello stoccaggio;
- sistemi di pianificazione e misurazione, per la logistica del sito e la pianificazione del layout, monitoraggio della produzione, ecc.



#### 4.4 I vantaggi del SCAN-TO-BIM

Il workflow SCAN-TO-BIM presenta molti vantaggi, tra cui [S13]:

- maggiore qualità del progetto: si ottengono rapidamente modelli degli asset estremamente accurati e dettagliati grazie alla riduzione dei tempi di acquisizione e all'elevato livello di precisione dei dati acquisiti rispetto ai rilievi di tipo tradizionale;
- riduzione degli errori nella modellazione e nella pianificazione del progetto: aumenta il livello di qualità della modellazione grazie all'accuratezza dei dati e delle informazioni raccolte;
- riduzione dei costi relativi al progetto: l'alto livello di accuratezza dei dati acquisiti e la riduzione dei tempi delle campagne di rilievo, permettono di ammortizzare gli elevati costi della strumentazione utilizzata durante il rilievo 3D e per la generazione del modello. È, infatti, innegabile l'importante abbattimento dei costi dovuti alla riduzione dei tempi di elaborazione e al valore aggiunto dal modello BIM;
- maggiore trasparenza e migliore cooperazione: la metodologia BIM consente la condivisione di dati più velocemente e in maniera più efficiente. Ciò è dovuto alla possibilità di avere a disposizione grazie al concetto di *"reverse engineering"* un unico modello ricco di informazioni (metriche, forma, geometrie, colore, ecc.) facilmente gestibile e condivisibile.

Tuttavia, ad oggi, non esistono soluzioni in grado di rendere completamente automatico il processo SCAN-TO-BIM. La modellazione tridimensionale, infatti, avviene sulla base di una nuvola di punti che deve essere analizzata, studiata e filtrata per poter individuare gli elementi e i riferimenti che possano essere d'aiuto nel riconoscimento dei principali componenti di un bene.

La ricostruzione del modello BIM dal rilievo digitale comporta, quindi, un notevole dispendio di tempi e risorse. Il processo di automazione nella restituzione del modello BIM dalla nuvola di punti non è ancora ottimizzato ma rappresenta un obiettivo per molti professionisti e produttori di software. Il processo tra l'acquisizione e la restituzione di dati in vari formati è ancora incompleto.

Inoltre, l'efficacia del modello BIM dipende in larga misura dalla sua corretta impostazione e progettazione iniziali, le quali vanno strutturate in funzione degli obiettivi da raggiungere. Fin dalla fase del rilievo, è indispensabile definire il livello di dettaglio ottimo. Nel caso, ad esempio, della manutenzione non occorre necessariamente definire la morfologia di ogni elemento ma piuttosto filtrare le informazioni in modo tale da far emergere gli aspetti più significativi ai fini di un'attenta gestione e manutenzione dell'opera [17]. In questa prospettiva, la scientificità delle procedure di acquisizione risulta strategica, sia per la creazione del database degli elementi esistenti, sia per lo studio prettamente esecutivo dei progetti volti al restauro e alla manutenzione [12]. L'azione principale va dunque rivolta alla codificazione del processo d'indagine adeguato al livello di analisi conoscitiva concordato e sottoscritto [BIM Execution Plan - BEP - PAS 1192-2:2013].

#### 4.5 LOD e Livello di fabbisogno informativo

Il BIM è stato sviluppato per facilitare il processo edilizio e la gestione delle commesse da parte dei professionisti facilitando lo scambio di dati durante l'iter progettuale. Tale metodologia in costante evoluzione e dal successo riconosciuto a livello internazionale è stata pensata fondamentalmente per la progettazione del nuovo. Questa caratteristica costituisce una significativa limitazione del BIM, soprattutto in un periodo storico in cui le attività di conservazione e di recupero del patrimonio storico e costruito sono molto diffuse nel nostro Paese. Tuttavia, oggi, si assiste a continue sperimentazioni di approcci BIM sul patrimonio esistente edilizio ed infrastrutturale con l'obiettivo

non solo di documentare lo stato dell'arte ma, anche, ai fini manutentivi e di progettazione futura dei beni.

In tale scenario nella norma italiana UNI 11337:2017 sono stati definiti specifici LOD dedicati alla conservazione/manutenzione ed al restauro di edifici o infrastrutture esistenti. In particolare, nella classificazione in lettere che va dalla A alla F è stato recentemente aggiunto il LOD G, il quale esprime la virtualizzazione aggiornata dell'elemento; ciò consente di tenere traccia dello storico degli interventi eseguiti sul manufatto sulla base di una stratigrafia storica che tiene in considerazione: datazione delle parti e dei componenti, periodo e data di manutenzione/sostituzione, il soggetto manutentore e la tipologia di intervento effettuato [12].

Le diverse scale LOD (acronimo che assume varie accezioni in base alla provenienza, ma che di fatto traduce il concetto di “*Livello di Sviluppo degli Oggetti Digitali*”) hanno assunto un ruolo guida nella definizione del processo evolutivo dei modelli BIM. Il contenuto informativo espresso da ogni singolo valore della scala deve essere adeguato alla fase, allo stato di lavorazione, agli *obiettivi* ed *usi dei modelli* (architettonico, strutturale, impiantistico) in modo da consentire l'estrazione degli elaborati grafici, delle quantità per la valutazione del computo metrico o dei dati necessari per la manutenzione degli impianti realizzati [8].

In genere, per *obiettivi* si intende la definizione delle finalità per cui si necessita di dati, informazioni o contenuti informativi nel processo. Gli *usi*, invece, definiscono l'impiego specifico degli stessi dati, informazioni o contenuti informativi che si necessitano [13]. L'unione di dati, informazioni (insieme strutturato e finalizzato di dati) e contenuti informativi (insieme strutturato e finalizzato di informazioni) è rappresentata dai *modelli informativi*. Il committente, in funzione delle proprie esigenze, stabilisce nel CI (*Capitolato Informativo*) le regole per la generazione dei contenuti informativi che intende sviluppare ed esplicita quali sono gli obiettivi e usi, ovvero quali sono il punto di partenza e il punto che intende raggiungere nella fase di avvio di una commessa.

Il *livello di fabbisogno informativo* rappresenta il grado di approfondimento per ogni *contenuto informativo* (modelli BIM, oggetti BIM e documento AEC) [13].

In origine questo compito era affidato ai *Level of Development (Livello di sviluppo) – LOD*, che come definito nell'AIA (*American Institute of Architects*) National Documents Committee, rappresentano «*il livello di completezza a cui è stato sviluppato un elemento del modello*» [AIA, 2008]. Furono inizialmente definiti 5 gradi di complessità del modello, con progressivi livelli di dettaglio, via via più accurati e dettagliati secondo una scala numerica crescente espressa in centinaia: 100/500 [13].

Nel 2011 il BIMForum, legato a Building Smart USA, pone le basi per la definizione, resa pubblica nel 2013, della LOD Specification, con la quale il significato di LOD cambia spostando l'attenzione sui dati di natura non geometrica distinguendo gli “*Element Geometry*” - attributi geometrici e gli “*Associated Attribute Information*” - attributi non geometrici [13]. Da queste considerazioni deriva la scala dei livelli di sviluppo degli elementi LOD statunitense (USA) (*Figura 4-1*):

- LOD 100: concept. Gli elementi non rappresentano geometrie, ma simboli o altre rappresentazioni generiche di informazioni.
- LOD 200: geometria approssimativa. Gli elementi sono rappresentati graficamente ma in modo generico, come volume, quantità, posizione o orientamento.
- LOD 300: geometria precisa. Gli elementi sono rappresentati graficamente come sistemi, oggetti o assieme specifici da cui è possibile misurare direttamente quantità, forma, dimensione, posizione e orientamento.

- LOD 350: adeguato alla realizzazione. Gli elementi sono migliorati con l'aggiunta di informazioni riguardanti le interfacce con altri sistemi di costruzione.
- LOD 400: "as built". Gli elementi sono modellati con dettagli e accuratezza sufficienti per la fabbricazione del componente rappresentato.

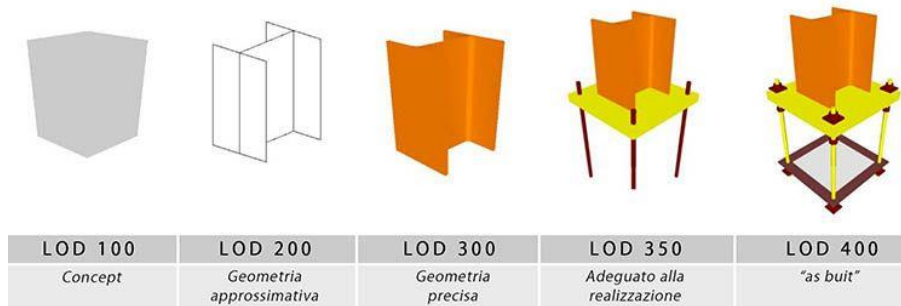


Figura 4-1 Level of Development (LOD) secondo la classificazione del BIMforum (Fonte, <https://www.infobuild.it/approfondimenti/bim-rivoluzione-digitale-edilizia-building-information-modeling/>)

Contemporaneamente nel Regno Unito (UK) la norma PAS 1192-2:2013 definisce il LOD come "Livello di Definizione" sviluppato in:

- *Level of Model Detail* – Livello di Dettaglio del modello (LOD), cioè la «descrizione del contenuto grafico dei modelli di ciascuna delle fasi» [BSI,2013];
- *Level of Information Detail* – Livello di dettaglio delle Informazioni (LOI), cioè la «descrizione del contenuto non grafico dei modelli di ciascuna delle fasi» [BSI,2013].

Nel 2015, grazie a uno strumento BIM gratuito sviluppato dal *Technology Strategy Board*, si passa dai LOD e i LOI dei *modelli* (progetto) ai LOD e i LOI degli *oggetti del modello* modificando la definizione da "Livello di dettaglio del modello" e "Livello di informazione del modello" a "Livello di dettaglio" e "Livello di informazione" degli oggetti, mantenendo comunque gli stessi acronimi: LOD e LOI [13]. La scala dei LOD diventa numerica espressa in unità e in parte legata alle fasi di sviluppo del progetto, così definita:

- 2-Concept stage
- 3-Developed design
- 4-Technical design
- 5-Construction

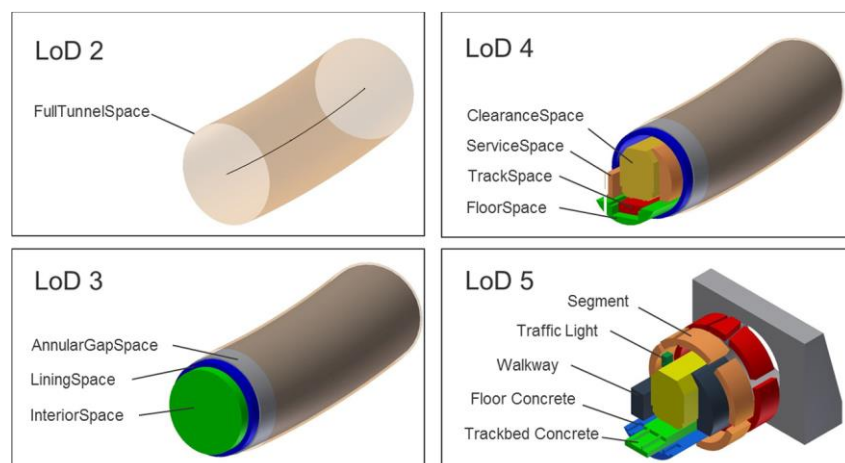


Figura 4-2 Illustrazione dei quattro differenti livelli di dettaglio (LOD) per tunnel.

Per la scala dei LOI, invece, viene aggiunto uno stadio (6-Operation and Maintenance) legato all'O&M.

In Italia la norma UNI 11337:2017 intende con l'acronimo LOD il "Livello di sviluppo dell'oggetto" e definisce i criteri e i requisiti per la definizione della rappresentazione grafica dell'oggetto (LOG: parte costituente dei LOD riferita agli attributi geometrici – UNI 11337-4:2017, 3.3.1) e per la caratterizzazione informativa (LOI parte costituente dei LOD riferita agli attributi non geometrici UNI 11337-4:2017, 3.3.2) che ne accompagna la redazione del database BIM (Figura 4-3).

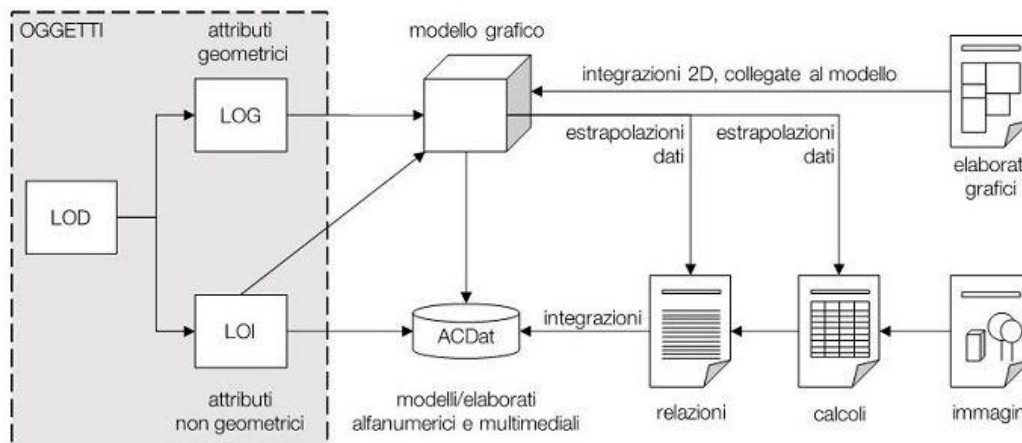


Figura 4-3 Flusso di dati nel processo digitale attraverso i LOD degli oggetti.

La normativa italiana introduce una novità nel concepire i LOD come una conseguenza della definizione di *obiettivi e usi* dei modelli BIM (UNI EN ISO 19650/11337-1:2017) anziché delle fasi del processo.

È stata definita, pertanto, una scala di valori caratteristici finita, progressiva ed alfanumerica in grado di separare i contenuti rappresentativi di un'istanza digitale e di servire da linea guida per la modellazione delle informazioni [8]. La scala della norma italiana UNI 11337:2017 risulta essere (Figura 4-4):

- LOD A: oggetto *simbolico*. Rappresentazione simbolica in 2D (o 3D se necessario). Non esprime vincoli di geometria. Le caratteristiche qualitative e quantitative sono puramente indicative.
- LOD B: oggetto *generico*. Rappresentazione geometrica generica o geometria di ingombro. Le caratteristiche qualitative e quantitative sono approssimate.
- LOD C: oggetto *definito*. Rappresentazione geometrica definita. Le caratteristiche qualitative e quantitative sono definite in via generica. Sono applicabili a tutte le entità similari.
- LOD D: oggetto *dettagliato*. Rappresentazione geometrica dettagliata. Le caratteristiche qualitative e quantitative sono specifiche di una pluralità di prodotti similari. Vengono inserite informazioni utili al montaggio ed alla manutenzione.
- LOD E: oggetto *specifico*. Rappresentazione geometrica specifica. Le caratteristiche qualitative e quantitative sono specifiche di un singolo sistema. Sono presenti informazioni relative a fabbricazione, assemblaggio e installazione (oltre a quanto utile per la manutenzione).
- LOD F: oggetto *eseguito (As-built)*. Rappresentazione geometrica specifica di quanto eseguito (verificata sul luogo). Le caratteristiche qualitative e quantitative sono quelle specifiche del prodotto posato. Sono presenti informazioni relative a fabbricazione, assemblaggio e installazione (oltre a quanto utile per la manutenzione) valide per tutto il ciclo vitale

dell'opera. Inoltre, nella parte informativa, vengono riportate eventuali forme di degrado presenti, certificati di collaudo e programmazione temporale degli interventi previsti (piano di manutenzione).

- LOD G: oggetto *aggiornato*. Rappresentazione storicizzata specifica dello specifico oggetto (verificata sul luogo). Le caratteristiche qualitative e quantitative sono quelle specifiche del prodotto posato ed aggiornate rispetto ad un precedente stato di fatto. Sono presenti informazioni relative a gestione, manutenzione e/o riparazione/sostituzione valide per tutto il ciclo vitale dell'opera. Viene inoltre registrato il livello di degrado dell'oggetto.

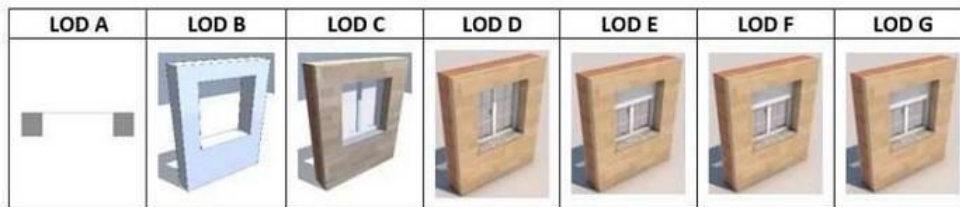


Figura 4-4 UNI 11337: esempio di LOD per l'elemento finestra (Fonte, <https://www.ingenio-web.it/articoli/i-loi-nelle-scale-di-lod-usa-uk-ita/>)

In Figura 4-5 vengono riportati i vari livelli di dettaglio a confronto e le fasi previste dal Codice dei Contratti Pubblici.

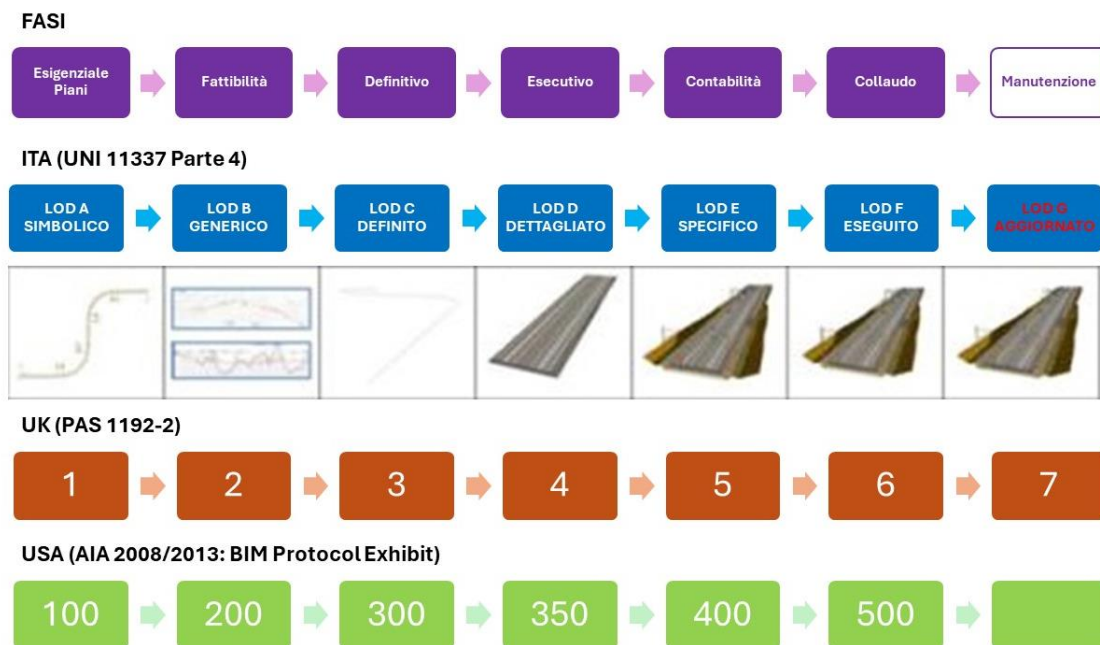


Figura 4-5 LOD italiani, UK e USA a confronto e fasi previste dal codice dei Contratti Pubblici.

Nel 2018 con l'adozione della ISO 19650-1:2019, successivamente entrata in vigore nel 2019 come "UNI EN ISO 19650-1:2019 Organization of information about construction works - Information management using building information modeling - Part 1: Concepts and Principles", per la prima volta si assiste ad un cambio di paradigma: i LOD sono sostituiti con i *Level of information Need (LoIN)*. Questa dicitura evidenzia come la definizione dell'obiettivo e dell'uso sia alla base della scelta sulle informazioni utili al progetto, evitando un inutile dispendio di informazioni. Tuttavia, lo standard sopra citato non suggerisce il "come" questi *Livelli di Fabbisogno Informativo* debbano essere calcolati. In tal senso è a supporto la "UNI EN 17412-1:2021 Building Information Modelling - Livello di fabbisogno informativo - Parte 1: Concetti e principi". Questa norma definisce la metodologia per stabilire il dettaglio e la quantità delle informazioni che devono essere scambiate e

fornite durante il ciclo di vita dei beni, rappresentando così il completamento della UNI EN ISO 19650-1:2018 [13].

Pertanto, il livello di fabbisogno informativo è un quadro che definisce la portata e la granularità delle informazioni aiutando l'incaricato a produrre solo ciò che è necessario produrre e consentendo, allo stesso tempo, di risparmiare tempo derivante dalla sovrapproduzione e dalla sottoproduzione di informazioni. Infatti, tramite il livello di fabbisogno informativo il committente prima e l'incaricato accettando dopo, definisce la qualità, la quantità e la granularità delle informazioni previste per ogni commessa in funzione dello scopo stabilito. All'interno di un modello informativo, oggetti diversi possono seguire diversi livelli di granularità e questi devono considerare gli usi attesi del modello e quali altre strutture dati si intende integrare all'interno del modello (ad esempio strutture di WBS) per evitare la creazione di strutture tra loro incompatibili. Un oggetto informativo può, infatti, contenere al suo interno una moltitudine di oggetti fisici afferenti a diverse attività del processo delle costruzioni. Le informazioni potrebbero essere riferite all'oggetto nel suo insieme o ai suoi singoli componenti considerando però la modalità con cui esprimere questa differente assegnazione dei campi informativi [13].

Sebbene precedente alla UNI EN 17412-1:2021, la normativa italiana UNI EN ISO 19650/11337-4:2017 già introduce la necessaria definizione di *obiettivi* e *usi informativi* utili a contestualizzare le richieste del Committente; l'attenzione è posta verso il patrimonio esistente, oltre a quello nuovo da costruire.

Secondo la UNI EN 17412-1:2021 la struttura del Livello di fabbisogno informativo si compone di due parti: Prerequisiti e Livello di Fabbisogno Informativo.

I prerequisiti adducono vantaggi soprattutto in ambito contrattuale-giuridico in quanto indagano su quattro aspetti di importanza strategica nella richiesta (*Figura 4-6*):

- *obiettivi e usi* del contenuto informativo, specificano cioè il “*perché*” (*scopo*) un'informazione viene richiesta;
- *milestone* delle consegne di progetto, cioè il “*quando*” l'informazione viene richiesta richiamando date specifiche o fasi di progetto;
- *attori* del processo, cioè “*chi*” chiede l'informazione e quale è l'incaricato che la fornisce;
- *oggetto* (ad. esempio un appalto), cioè a “*cosa*” associa il Livello di Fabbisogno Informativo. In questo caso per oggetto si intende “parti” e/o “sistemi” come, ad esempio, i sistemi di ventilazione o interi edifici andando oltre il canonico significato che indicava, invece, il solo singolo oggetto come porta, finestra, ecc.

In questo modo si stabiliscono dei punti chiave su cui tutto il progetto si deve basare, riducendo la libera interpretazione dei requisiti e consentendo il controllo sull'adempimento alle richieste contrattuali.



Figura 4-6 Prerequisiti e livello di fabbisogno informativo. (Fonte, <https://www.ingenio-web.it/articoli/nuova-norma-uni-en-17412-1-dai-lod-al-livello-di-fabbisogno-informativo/>)

Il livello di fabbisogno informativo, invece, lega con il tema della qualità del prodotto informativo. Non a caso riguarda nello specifico:

- informazioni **geometriche**, espresse in dettaglio, dimensionalità, posizione, aspetto e comportamento parametrico;
- informazioni **alfanumeriche**, espresse in identificazione (nome e/o codifica), contenuto informativo (data scadenza, costo, trasmittanza termica, ecc.);
- **documentazione**, espressa in set di documenti come relazioni di calcolo e certificazione di conformità.

Di seguito (Tabella 4-1), viene riportato un esempio di Livello di Fabbisogno Informativo per un elemento di un Asset.

| Consegna delle informazioni       | Gestione e manutenzione di un Asset                                      |
|-----------------------------------|--|
| Scopo                             | <i>Gestione e manutenzione</i>   |
| Attore                            | <i>Gestore/manutentore</i>   |
| Oggetto                           | <i>Porta</i>   |
| <b>Informazioni Geometriche</b>   |  |
| Dettaglio                         | <i>LOD300</i>  |
| Dimensionalità                    | <i>6D</i>  |
| Posizione                         | <i>assoluta</i>  |
| Aspetto                           | <i>Non richiesto</i>   |
| Comportamento parametrico         | <i>Non richiesto</i>   |
| <b>Informazioni Alfanumeriche</b> |  |
| Identificazione                   | <i>tipo di porta</i>   |
| Contenuto informativo             | <i>ID, materiale, colore, resistenza al fuoco</i>                        |
| Documentazione                    | <i>Scheda tecnica, bolla d'acquisto, garanzia, piano di manutenzione</i> |

Tabella 4-1 Esempio di livello di fabbisogno informativo per la gestione e manutenzione di un Asset (Rielaborazione da un esempio tratto da [14])

Inoltre, rispondente ai vincoli di legge, alla fase, agli obiettivi e agli usi definiti, oltre alla significatività delle possibili interferenze o incoerenze da analizzare o verificare, determinerà:

- il grado di modellazione necessario;
- il grado di possibile integrazione mediante elaborati (disegni 2D, testi, immagini, ecc.);
- la quantità, la qualità e la solidità (grado decisionale) dei dati e degli attributi necessari.

Esprimere le richieste in questa modalità facilita il confronto automatico e semiautomatico tra richieste e informazioni prodotte e migliora la flessibilità ed efficacia dei processi in quanto si evitano richieste generiche che generano troppe e/o carenza di informazioni. Per questo motivo non è più possibile ridurre ad una scala (LOD A/B/C..) queste informazioni, esse devono essere approfondite dal Committente all'interno del Capitolato Informativo (CI) in forma chiara e univoca per tutti [13].

Oltre alla definizione di quali informazioni geometriche e non geometriche e di quali documenti siano da associare ad uno specifico oggetto, ad un gruppo di oggetti o ad un modello è opportuno identificare quali siano le informazioni da non considerare all'interno del modello stesso. Per garantire il funzionamento degli strumenti di modellazione esistono infatti alcuni campi informativi precompilati e gestiti direttamente dallo strumento che potrebbero però non avere alcuna rilevanza per lo specifico progetto. Nell'identificazione delle informazioni associate ai modelli informativi ed ai singoli oggetti informativi è sempre opportuno dare evidenza delle informazioni che non sono da considerare in quanto non utili all'intervento in oggetto. Se infatti, ad esempio, un campo informativo precompilato definisce caratteristiche prestazionali relative ad un oggetto e queste non sono in nessun caso state definite da progettisti, committenti, imprese, ecc. potrebbero nascere indesiderate conseguenze nello sviluppo del processo [13].

La ISO 19650-1 specifica che il livello di fabbisogno informativo dovrebbe essere determinato considerando il minimo quantitativo di informazioni necessarie per rispondere ad ogni requisito definito all'interno della catena di soggetti coinvolti nel processo. Questa posizione definita all'interno della norma può essere interpretata in termini di valore delle informazioni prodotte e quindi di costo rispetto alla gestione delle stesse. Si prenda in considerazione il grafico riportato nell'immagine seguente (Figura 4-7).

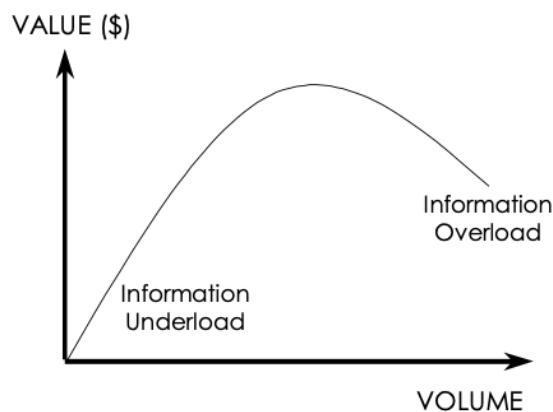


Figura 4-7 Rapporto tra volume e valore delle informazioni (Fonte, D Moody and P.Walsh, "Measuring The Value Of Information: An Asset Valution Approach," in Seventh European Conference on Information Systems (ECIS'99), 1999, pp. 1-17).

Partendo da un volume di informazioni nullo (origine degli assi), ovvero nessuna informazione, si registra un progressivo incremento del valore al crescere delle informazioni introdotte nei modelli. Tale valore cresce fino a un punto di massimo che, nella lettura in ambito di sviluppo dei modelli digitali, corrisponde al raggiungimento del livello di fabbisogno informativo stabilito [13].

Quando la quantità di informazioni supera questo limite, ne consegue un sovraccarico di informazioni e la comprensione degrada rapidamente [Lipowski, 1975]. In pratica si è riscontrato che le prestazioni del processo decisionale diminuiscono una volta che la quantità di informazioni supera un certo punto ottimale [O'Reilly, 1980; Driver e finta, 1975; Jacoby et al, 1974]. Questo aspetto può essere letto considerando le componenti di costo e beneficio associate alla definizione delle informazioni. Ogni informazione creata deve infatti rispondere ad almeno tre voci di costo:



- creazione: l'informazione deve essere creata ed integrata/relazionata al modello informativo;
- verifica: l'informazione deve essere controllata per garantirne la congruità;
- aggiornamento: l'informazione deve essere aggiornata e mantenuta nel tempo per garantire la credibilità del modello [13].

A fronte di questi costi, l'uso efficace dell'informazione porta a degli evidenti benefici nel processo di sviluppo del progetto ripagando i costi stessi e definendo una crescita del valore associata all'informazione. D'altro canto, l'imputazione di informazioni non richieste e quindi non utilizzate dai soggetti coinvolti nel processo né da soggetti futuri comporta le medesime voci di costo senza alcun ritorno effettivo portando ad una progressiva perdita di valore nello sviluppo dei modelli informativi.

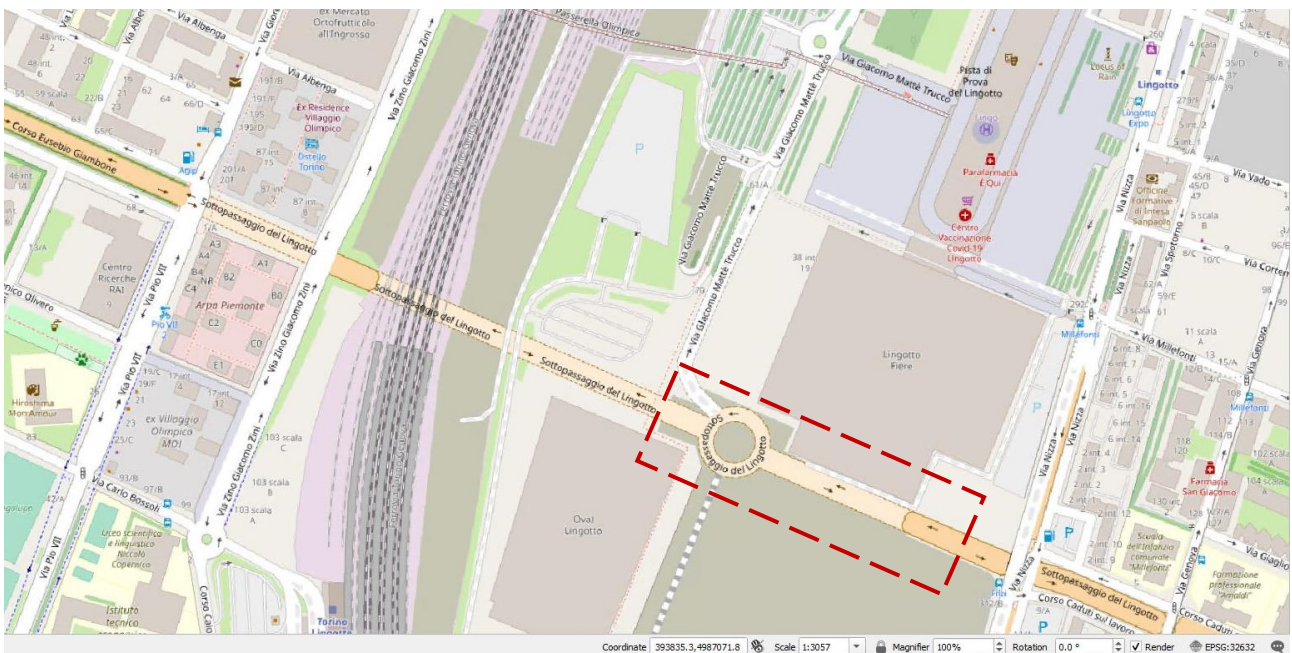
Come già detto, gli *obiettivi* sono costituiti dalle finalità per quali è necessario disporre di un certo contenuto informativo, mentre l'*uso* costituisce l'impiego specifico del medesimo contenuto. L'obiettivo può essere, ad esempio, la programmazione di un intervento di manutenzione; l'uso è l'estrazione di certi dati dal modello necessari all'intervento programmato. Gli usi e obiettivi hanno un rilevante ruolo giuridico e contrattuale, perché coinvolgono sostanzialmente la "causa" per la quale le parti addiventano alla sottoscrizione del contratto per l'esecuzione di una prestazione BIM e "come" essa viene declinata attraverso le obbligazioni che il committente richiede e a cui l'affidatario deve adempiere. È necessario, pertanto, che gli obiettivi e gli usi siano in modo chiaro identificati nella documentazione contrattuale e specificati nel Capitolato Informativo. Nella filiera dei soggetti coinvolti nelle prestazioni BIM, tale compito spetta in primo luogo al committente: egli, mediante queste categorie e con i livelli di informazione necessari, esprime le sue concrete esigenze ai possibili offerenti (in caso di procedura di gara) o comunque all'operatore economico con cui si sta rapportando (in caso di affidamento diretto). A loro volta, questi ultimi (offerenti/operatori economici) verificano obiettivi, usi e livelli di informazione indicati dal Committente e valutano la loro capacità di raggiungerli e, ove consentito, di puntualizzarli. Una volta concluso il contratto, usi, obiettivi e livelli di informazione diventano insieme al contenuto informativo richiesto, alla sua struttura, organizzazione e coordinamento il parametro di riferimento per l'individuazione dell'oggetto del contratto stesso e della prestazione richiesta e dovuta. In sintesi, quindi potremmo dire che la definizione di Obiettivi, usi e livelli di fabbisogno informativo risulta di fondamentale importanza all'interno di un Capitolato Informativo, in quanto individuano il pacchetto di avvio indispensabile per lo sviluppo dell'intero documento e della commessa stessa [13].

Nel capitolo seguente viene introdotto il caso studio scelto per il presente lavoro di tesi per verificare l'applicabilità della procedura SCAN-TO-BIM alle infrastrutture (InfraBIM) e analizzare i pregi e i difetti del flusso di lavoro organizzato a partire dal rilievo laser scanner terrestre.

## 5. Caso studio: sottopassaggio Lingotto

### 5.1 Inquadramento del caso studio

Il lavoro di tesi ha come caso studio il primo tratto del sottopassaggio stradale del Lingotto nel comune di Torino tra Via Nizza e la rotonda sotterranea del diametro di 52 m realizzata per garantire la viabilità di accesso dal sottopasso Lingotto esistente al nuovo grattacielo sede della Regione Piemonte a Torino. Si tratta di un'opera strategica poiché si trova nel quartiere di Millefonti Lingotto della zona Sud della città di Torino, Circostrizione 8, in adiacenza al Pala Oval e alla Fiera tra Corso Giambone e Corso Unità d'Italia, all'interno dello storico insediamento industriale dove un tempo insistevano le fabbriche della Fiat ex-Avio e le aree di RFI (*Figura 5-1*).



*Figura 5-1* Planimetria dell'area sud di Torino: all'interno del riquadro rosso è indicato il tratto del sottopasso scelto come caso studio (tra Piazza Filzi e la rotonda Lingotto).

#### 5.1.1 Cenni storici

Il sottopasso del Lingotto è uno dei numerosi interventi connessi all'abbassamento del piano del ferro tra lo scalo Vallino (Porta Nuova) e Porta Susa che fu costruito, tra il 1930 e il 1933, per superare l'attraversamento della ferrovia e servire gli stabilimenti industriali di produzione della fabbrica automobilistica FIAT, poi riconvertiti a grande centro polifunzionale [S14].

Il tunnel è stato realizzato parte in trincea e parte in galleria (*Figura 5-2*), con una lunghezza circa di 580 metri e una luce di 15 metri, provvisto di sede tranviaria a doppio binario per collegare il corso Girgenti (l'attuale corso Giambone) con Piazza Fabio Filzi (Via Nizza) [S14].



Figura 5-2 Sottopassaggio Lingotto, Via Nizza, Torino, vista del cantiere da est durante gli scavi, 1933, stampa alla gelatina bromuro d'argento. (Fonte [www.fondazionetorinomusei.it](http://www.fondazionetorinomusei.it), Mario Gabinio).

È una delle opere infrastrutturali del regime progettata nel 1928 e inaugurata nel 1933 (Figura 5-3) ed è una testimonianza di come la qualità tecnologica e formale delle strutture in cemento armato realizzate negli anni tra le due guerre mondiali includevano anche costruzioni strettamente utilitarie come cavalcavia, sottopassi, muri controterra [S14].



Figura 5-3 Sottopassaggio Lingotto, Via Nizza, Torino, vista da est dell'opera ultimata, 10-1933, stampa alla gelatina bromuro d'argento. (Fonte [www.fondazionetorinomusei.it](http://www.fondazionetorinomusei.it), Mario Gabinio).



Figura 5-4 Sottopassaggio Lingotto, Via Nizza, Torino, interno, vista assiale in controluce nei pressi di un imbocco, 01/12/1933, stampa alla gelatina bromuro d'argento. (Fonte [www.fondazionetorinomusei.it](http://www.fondazionetorinomusei.it), Mario Gabinio).

Durante la Seconda guerra mondiale fu facile bersaglio dei bombardamenti aerei da parte degli anglo-americani del 15 maggio 1944 e solo dopo terminata la guerra fu prolungato fino a Corso Unità d'Italia [S14].



Figura 5-5 Sottopassaggio Lingotto, Via Nizza, Torino, vista generale notturna dall'imbocco orientale dell'interno illuminato, 10-1933, stampa alla gelatina bromuro d'argento. (Fonte [www.fondazionetorinomusei.it](http://www.fondazionetorinomusei.it), Mario Gabinio).



Figura 5-6 Sottopassaggio Lingotto, Via Nizza, Torino, interno, vista assiale nei pressi di una bocca di luce, 27/12/1933, stampa alla gelatina bromuro d'argento. (Fonte [www.fondazionetorinomusei.it](http://www.fondazionetorinomusei.it), Mario Gabinio).

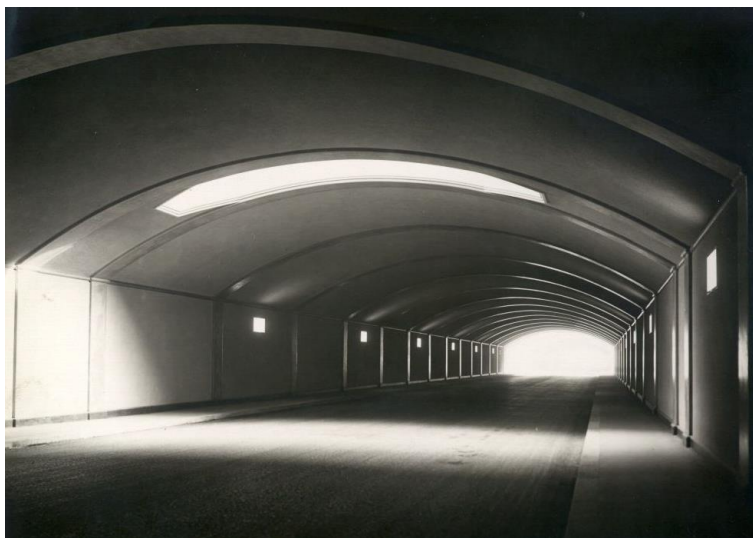


Figura 5-7 Sottopassaggio Lingotto, Via Nizza, Torino, interno, vista di scorcio nei pressi di una bocca di luce, 10-1933, stampa alla gelatina bromuro d'argento. (Fonte [www.fondazionetorinomusei.it](http://www.fondazionetorinomusei.it), Mario Gabinio).

### 5.1.2 Interventi di manutenzione frequenti del sottopasso lingotto

Negli anni molti sono stati gli interventi di manutenzione come documentano gli articoli giornali dai meno recenti a quelli più recenti. Nella *Figura 5-8* viene riportato l'estratto di un articolo di giornale della "La Stampa" tratto dall'archivio storico del 20 marzo 1996 n.79 pagina 33 dove è scritto "Venerdì riapre il tunnel Lingotto. La nuova bretella che collega il sottopasso con il lingotto è pronta. Anche il lifting è pressoché completato. Mancano pochi ritocchi. L'illuminazione è stata rifatta, sono stati collocati pannelli assorbenti, è stato sistemato il new Jersey tra le due carreggiate...collaudo delle luci stasera. Poi resterà solo più da installare la nuova segnaletica. Il sottopasso è chiuso dall'agosto scorso... [S15]".



Figura 5-8 Estratto dell'articolo tratto dall'archivio storico la stampa 20 marzo 1996 n.79 pagina 33 [S15].

Anni di chiusure a singhiozzo caratterizzano un'infrastruttura strategica per i torinesi ormai rassegnati e che, forse, hanno imparato a farne a meno. L'ultimo cantiere in corso è partito a settembre 2022 per rinforzare tratto per tratto tutta la galleria di uno degli snodi viari principali di Torino che comporta interruzioni della circolazione alternate nelle due direzioni. Si andrà avanti così ancora per qualche anno: la fine definitiva dei lavori non è stimabile, perché per gli ultimi lotti vanno ancora trovate le risorse [S19].



Figura 5-9 Confronto tra il passato e il presente - Foto a sinistra: tram in Via Nizza, Torino, 1970 (Fonte Fondazione Istituto Piemontese Antonio Gramsci - Archivio storico (R0166260 006.017) Foto a destra: Vuoto urbano, sottopasso chiuso, aree industriali dismesse, 2020 (Fonte <http://www.gramscitorino.it>, Francesca Macciò).

### 5.1.3 L'urbanizzazione del grattacielo Regione Piemonte e la nuova viabilità collegata al sottopasso

Il 4 febbraio 2019 (data di consegna dei lavori) Regione Piemonte (Stazione Appaltante) consegna, per un importo lavori finale di 32,35 milioni di euro, alla Strabag S.p.A. (impresa esecutrice dei lavori) i lavori della nuova viabilità interrata e superficiale al servizio del Nuovo Palazzo della Regione Piemonte e strettamente connessi alla sua realizzazione. Le opere di infrastrutturazione e urbanizzazione generale della "Zona urbana di Trasformazione" (ZUT) "Avio-Oval" della città di Torino inaugurate il 5 luglio 2022 sono state [18]:

- una rotonda interrata all'interno del sottopasso Lingotto;
- un sistema di viabilità interrata a "T" con accesso ai parcheggi del nuovo Palazzo della Regione;
- una viabilità di superficie a servizio dell'area;
- due bretelle di raccordo a senso unico;
- un ulteriore ramo di viabilità in adiacenza allo scalo ferroviario RFI e a Via Passo Buole.

Le tipologie di intervento legate alla nuova viabilità sono state pertanto sia tratti all'aperto che opere in sotterraneo, esclusivamente dedicati all'accesso e all'uscita dai parcheggi interrati del Palazzo Regione, inseriti in un contesto urbano fortemente antropizzato. Il principale parametro utilizzato per la progettazione plano-altimetrica è stato la velocità di progetto assunta pari a 30 km/ora [18].

Il nuovo sistema viario interrato che permette l'accesso ai parcheggi del Palazzo Regione è costituito da due tratti di galleria artificiale formanti una "T", i quali sono collegati grazie a due rotonde interrate, di cui una consente la riorganizzazione dell'innesto con il sottopasso Lingotto e l'altra invece regola i flussi di traffico lungo le rampe verso Via Nizza e la ferrovia. In sotterraneo la viabilità si sviluppa pertanto lungo due assi denominati (*Figura 5-10*):

- asse 1 "rotonda adiacente scalo RFI Lingotto - Via Nizza";
- asse 2 "rotonda interrata sottopasso Lingotto - rotonda interrata Regione".



Figura 5-10 La planimetria della nuova viabilità (in verde) che si collega al sottopasso Lingotto tramite due rotonde interrate, rotonda Regione e Rotonda Lingotto rispettivamente a sinistra e a destra nell'immagine [18].

La rotatoria Lingotto è una doppia rotatoria interrata e superficiale in sovrapposizione (*Figura 5-11*):

- rotatoria interrata a livello del Sottopasso di Corso Giambone del diametro di 52 metri con isola centrale;
- rotatoria sopraelevata a livello piano stradale di superficie del diametro 52 metri senza pilastro centrale (unica in Europa) [18].



*Figura 5-11 Rotatoria Lingotto interrata e sopraelevata rispettivamente a sinistra e a destra della figura.*

La rotatoria presenta una copertura realizzata in carpenteria metallica S355 del peso complessivo di circa 730 tonnellate (*Figura 5-12*).



*Figura 5-12 Posa della maxi-cupola in acciaio [S18]*

La struttura portante della copertura in acciaio ha la caratteristica di essere costituita da 24 travi radiali tra loro collegate da più serie di travi anulari concentriche. Il settore periferico della struttura è caratterizzato da una soletta carrabile in conglomerato cementizio armato (*Figura 5-13*), verificata per traffico pesante (circa 1300 t). L'opera è costata 4.400.000.000 euro.



Figura 5-13 Posa della maxi-cupola in acciaio [S18]

#### 5.1.4 Il sottopasso del Lingotto tra le infrastrutture con priorità di intervento

Il sottopasso del Lingotto è una delle infrastrutture viabili della città di Torino che, a seguito delle verifiche condotte ai sensi delle normative in campo strutturale emanate dopo il crollo del ponte Morandi di Genova (in particolare le *"Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti"* del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti), è rientrata tra le infrastrutture con priorità di intervento di tipo 1, vale a dire la più urgente e inderogabile in termini di ripristino delle adeguate condizioni di esercizio e di durabilità delle strutture. Conseguentemente, considerata l'importanza strategica e viabilistica dell'infrastruttura in oggetto, il Comune di Torino – Città Metropolitana si è subito attivata per il reperimento dei fondi economici necessari per l'esecuzione delle prove in sito e per la successiva progettazione degli interventi strutturali in parte già eseguiti [S16].

In particolare, gli interventi sono sugli impalcati dei vari tratti in galleria di cui si compone il sottopasso, sulle opere di sostegno (muri laterali e pilastrate, travi e solette degli impalcati) ammalorati a causa degli effetti degli agenti atmosferici e l'inquinamento. Gli obiettivi di tali interventi sono pertanto il rinforzo strutturale e risanamento conservativo del sottopasso Lingotto, l'aumento della durabilità agli agenti esterni e l'adeguamento dell'infrastruttura alla normativa vigente in materia di viabilità stradale.

I fondi stanziati per il tratto tra Via Genova e Via Nizza sono 995 mila €. L'intervento fa parte dell'appalto di manutenzione straordinaria annuale dei ponti cittadini ed è tra gli interventi previsti nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) e i fondi nazionali dell'Unione Europea che cambieranno la città di Torino.





Figura 5-14 Lavori di rifacimento del piano stradale e sostituzione dei dispositivi di ritenuta [S17].

In particolare, gli ultimi interventi ultimati a fine 2023 sono in corrispondenza del tratto di galleria del sottopasso al di sotto di via Genova prima e via Nizza dopo. Nello specifico, si tratta del rinforzo strutturale dell'intradosso dell'impalcato mediante beton plaqu  e delle pilastrate mediante incamiciatura in cemento armato, insieme al risanamento conservativo dei muri di sostegno laterali, alla sostituzione dei giunti di dilatazione dell'impalcato e al rifacimento dell'impermeabilizzazione e del pacchetto di pavimentazione stradale. Inoltre, sono previsti l'abbassamento del piano stradale all'interno della galleria (per l'adeguamento dell'altezza netta di 5 metri), l'installazione di nuovi dispositivi di ritenuta e la manutenzione della rete di raccolta delle acque meteoriche [S17].

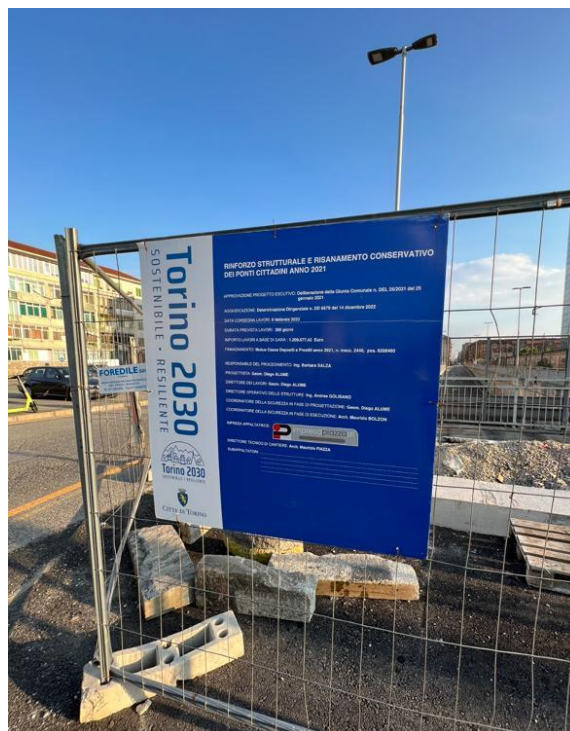


Figura 5-15 Cartello di cantiere Torino 2030 Rinforzo strutturale e risanamento conservativo dei ponti cittadini Lotto 2 2021.



Figura 5-16 Il sottopassaggio del Lingotto allagato dal temporale, Torino 4 agosto 1970 (Fonte, [https://archivi.polodel900.it/R0166260\\_009.027](https://archivi.polodel900.it/R0166260_009.027)).

“La città di Torino conta circa 230 tra ponti, sottopassi e viadotti. Si tratta di un patrimonio rilevante che va curato, individuando gli interventi necessari grazie a un monitoraggio puntuale e costante dello stato di salute delle infrastrutture, che richiede capacità di intervento e risorse importanti per la manutenzione e messa in sicurezza. Grazie a questo finanziamento ministeriale possiamo pianificare l'avvio del secondo lotto di lavori di manutenzione straordinaria di un'infrastruttura fondamentale per il collegamento est - ovest della città, consapevoli di quanto sia importante investire sulla sicurezza dei cittadini che percorrono le nostre strade e che vivono il territorio” - commenta l'assessore Tresso [S20]. “Dopo gli interventi in corrispondenza dell'impalcato di via Genova ancora in corso, da fine gennaio 2023 sono iniziati, nell'ambito di un secondo appalto, anche gli interventi in corrispondenza dell'impalcato di via Nizza [S20].”



Figura 5-17 Lavori manutenzione impalcato sotto Via Nizza.



Figura 5-18 Lavori di ripristino, impermeabilizzazione e conservazione sopra e sotto l'impalcato di Via Nizza.

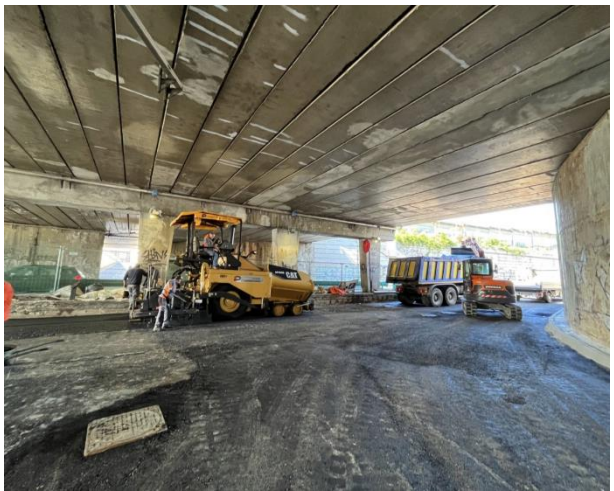


Figura 5-19 Lavori impalcato sotto Via Nizza.

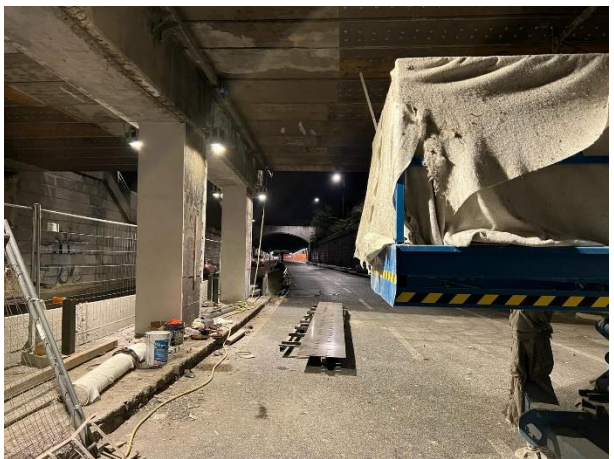


Figura 5-20 Lavori di manutenzione nella semicarreggiata da Corso Giambone a Via Nizza (novembre 2023).

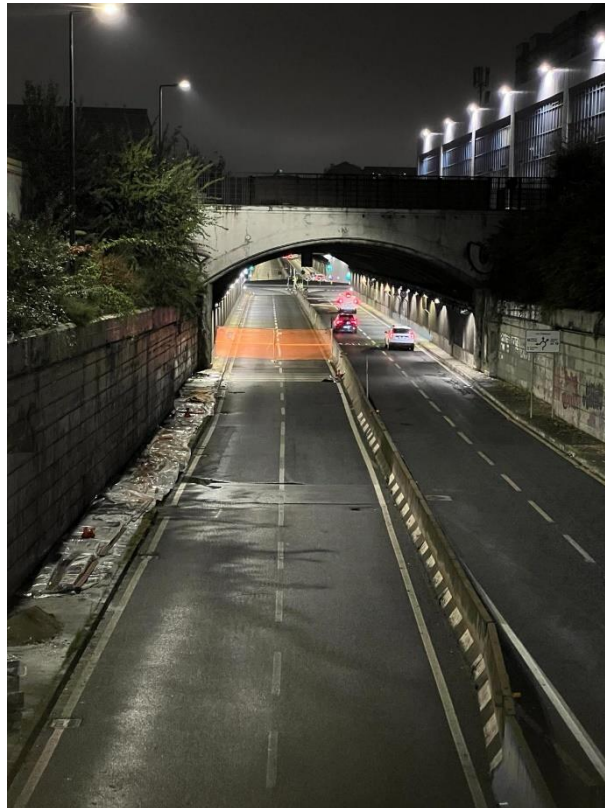


Figura 5-21 Semicarreggiata da Corso Giambone a Via Nizza chiusa per lavori di manutenzione straordinaria (novembre 2023).

## 5.2 Obiettivi del lavoro di tesi

L'obiettivo del seguente lavoro di tesi è la digitalizzazione di una parte di un'infrastruttura strategica per la città di Torino ai fini manutentivi. Partendo dai dati LiDAR è stato possibile applicare la metodologia SCAN-TO-BIM creando un modello digitale del tratto di sottopasso Lingotto scelto.

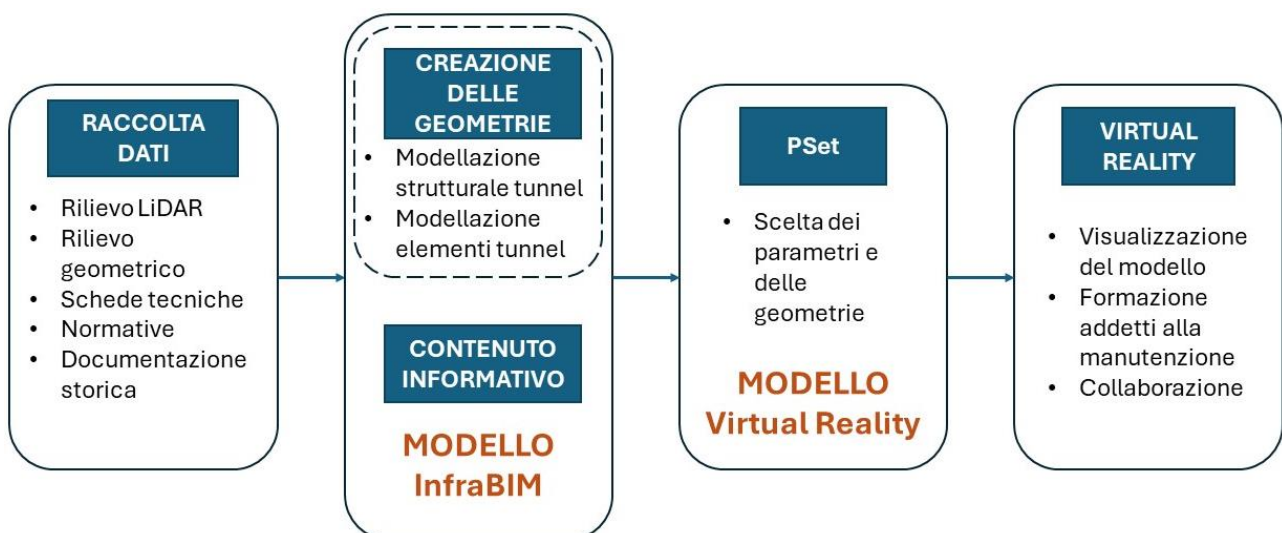


Figura 5-22 Workflow applicato al caso studio

La conoscenza dell'Asset è partita quindi dal rilievo LiDAR e dal rilievo geometrico in sito; in particolare, a partire dal rilievo con Laser Scanner è stato possibile riprodurre tutti gli elementi caratteristici dell'infrastruttura.



Figura 5-23 Segnaletica stradale verticale (segnale “limite di velocità 50 km/h” a sinistra e segnale “attenzione viabilità modificata” a destra).

L’attenzione del rilievo è stata posta negli elementi strutturali dell’opera (pavimentazione, marciapiedi, piedritti e calotta del tunnel) e successivamente tutti gli elementi tipici di un tunnel stradale quali impianti (impianto di illuminazione, chiusini dei pozzetti), segnaletica verticale, porte ed elementi di arredo del tunnel (pannelli fonoassorbenti e fonoisolanti, barriera New Jersey). Per quanto riguarda l’impianto di illuminazione sono stati modellati i derivatori, i dispositivi di illuminazione e le passerelle cavi con le relative staffe. La finalità principale di tale processo di digitalizzazione è quello fare una fotografia dello stato attuale dell’opera e di creare un database aggiornato utile al gestore per le fasi di gestione e manutenzione.



Figura 5-24 Dispositivi di illuminazione, derivatori, staffe passerella cavi, passerella cavi, porte e pannelli fonoassorbenti presenti lungo il sottopasso Lingotto.

Per creare un modello dell’esistente (modello as-is) utile per le attività operative e manutentive da parte dell’Ente Gestore è stato utilizzato il software di modellazione Autodesk Revit, impostando:

- **famiglie e categorie:** hanno consentito la modellazione dei singoli elementi strutturali, impiantistici e di arredo del tunnel;
- **parametri:** le informazioni del modello, quali ad esempio ID, geometria, materiale e dati manutenzione.

Per ogni singolo elemento sono state create delle famiglie ad hoc e assegnato un contenuto informativo specifico; sono state prese le schede tecniche dai siti internet dei vari produttori necessarie per la creazione e compilazione dei parametri. Il set di informazioni raccolto è stato

classificato e codificato e raccolto all'interno di una cartella esterna (CDE) al progetto. Tramite link è stato possibile richiamare e visualizzare tale contenuto informativo relativo alle varie famiglie caricate nel modello.



Figura 5-25 Workflow seguito per la creazione del modello as-is per attività manutentive.

Il modello BIM creato (modello as-is) potrà essere caricato in un'apposita sezione del CDE dell'Ente Gestore, il vero modello di dati, così da permetterne l'aggiornamento delle informazioni di dettaglio (scheda tecnica, manuale d'uso, ecc.) negli anni a venire in seguito agli interventi manutentivi che vengono effettuati sull'asset. Grazie alla geo-localizzazione e al posizionamento delle facility sarà più facile tenere traccia degli interventi eseguiti e guidare le squadre incaricate per la gestione e manutenzione del tunnel anche da remoto. Il modello BIM è quindi un modello digitale grafico arricchito di informazioni alfanumeriche utili per il gestore per impostare le attività necessarie per la sua gestione e manutenzione (ordinaria e straordinaria) [1].

Sulla base degli obiettivi prefissati è stato definito, quindi, il contenuto informativo di ciascun elemento del tunnel con una struttura dati conforme a quanto indicato nelle schede tecniche di ogni oggetto del modello. Il patrimonio informativo di dati che è possibile generare e collezionare attraverso la gestione dei modelli informativi, rappresenta la reale ricchezza della metodologia BIM.

L'applicazione della metodologia BIM al caso studio ha come vantaggi, oltre alla gestione centralizzata delle informazioni, il migliore coordinamento tecnico e operativo da parte del gestore. Tutte le informazioni confluiscono in un unico modello virtuale dell'opera, che oltre a rappresentare il manufatto tridimensionalmente, diventa un contenitore di informazioni georeferenziate facilmente implementabile durante le fasi di gestione e manutenzione dell'asset. Pertanto, diventa per il gestore uno strumento utile per effettuare in ogni momento verifiche e aggiornamenti. Inoltre, grazie alla realtà virtuale, può essere utilizzato per la formazione (training) del personale addetto alle operazioni di manutenzione che devono essere effettuate sul campo. Altro vantaggio è nella migliore efficacia di comunicazione dei problemi (issues) agli attori coinvolti nel processo manutentivo quali progettisti e squadre specializzate incaricate dal gestore alla manutenzione; il modello in realtà virtuale rappresenta un valore aggiunto in termini di collaborazione e di coordinamento tra il gestore e le squadre specializzate grazie agli strumenti di visualizzazione e interrogazione. Infine, il gestore può simulare in maniera digitale le operazioni di gestione e di manutenzione [1].

## 6. Acquisizione ed elaborazione dati Laser Scanner

In questo capitolo verranno descritte le modalità di acquisizione e preelaborazione di dati di rilievo LiDAR eseguite al fine di creare un modello digitale tridimensionale del tratto iniziale tra l'imbocco lato est e la "rotonda Lingotto" del Sottopassaggio del Lingotto del comune di Torino.

### 6.1 Acquisizione dei dati tramite LIDAR

Prima di effettuare il rilievo e acquisire i dati con laser scanner terrestre (TLS), è stata eseguita una attenta pianificazione del rilievo. Il rilievo, eseguito sia con tecniche topografiche tradizionali sia innovative per creare una rete topografica di inquadramento, si compone di varie fasi: rilievo di inquadramento e di raffittimento al fine di definire un sistema di riferimento comune necessario per la georeferenziazione del rilievo, rilievo LiDAR e georeferenziazione dei marker.

Per creare la rete topografica di inquadramento sono stati scelti cinque punti di stazione, detti *vertici*, con una buona visibilità satellitare e accessibilità per la messa in stazione (1000, 2000, 3000, 4000 e ROTONDA) così distribuiti (Figura 6-1):

- 1000 (Figura 6-4) e 2000 vicino all'imbocco lato est del sottopasso (entrambi gli accessi ai passaggi pedonali al sottopasso da piazza Fabio Filzi – Via Nizza);
- ROTONDA al centro della rotonda Lingotto per fornire una sufficiente visibilità satellitare (Figura 6-2);
- 3000 e 4000 vicino all'imbocco lato ovest del sottopasso.



Figura 6-1 Posizione dei vertici della rete topografica di inquadramento.



Figura 6-2 Stazionamento con ricevitore GNSS nel vertice "Rotonda" al centro della rotonda del sottopasso Lingotto.

Per determinare le coordinate e le altezze ellissoidiche dei vertici della rete è stata impiegata la seguente strumentazione GNSS (Global Navigation Satellite System): una stazione totale (Image Station Leica Geosystem TS06plus) e due ricevitori GNSS (Leica Geosystem GS14 e GS18) che supportano le costellazioni GPS e GLONASS e la doppia frequenza (L1 e L2) (Figura 6-3).



Figura 6-3 Strumentazione per i rilevamenti eseguiti con metodi tradizionali (stazione totale Leica TS06plus a sinistra dell'immagine, ricevitore GNSS Leica GS14 al centro e prisma circolare di precisione Leica GPR121 a destra dell'immagine [S21], [S22]).

La rete topografica di inquadramento è stata materializzata a terra mediante centrini universali infissi nell'asfalto con rondella metallica per eventuali operazioni di misura future (Figura 6-4).





Figura 6-4 Stazionamento con treppiede e ricevitore GNSS Leica GS14 sul vertice "1000" materializzato a terra con centrino.

La modalità di acquisizione GNSS usata è di tipo rapido-statica che consiste in un posizionamento relativo alle differenze doppie, con determinazione delle baseline tra le stazioni (differenze di coordinate tra coppie di punti). Il tempo di acquisizione è funzione della precisione che si vuole raggiungere e dalla lunghezza della baseline; nel presente caso è stato scelto un tempo di acquisizione di circa 1 ora per raggiungere una precisione millimetrica. Lo stazionamento è stato eseguito posizionando la stazione totale, agganciata al treppiede con l'apposita vite, sulla verticale del punto materializzato e un ricevitore GNSS.

Le misure dei vetrici sul campo essendo basate sui dati inviati dai satelliti sono stati post-processati in laboratorio tramite il software LEICA Geo Office (LGO) versione 8.3 al fine di avere una stima corretta della loro posizione. In particolare, le misure sono state compensate con i dati da alcune stazioni prossime al sottopasso con il servizio SPIN GNSS. Tali misure sono state acquisite utilizzando come sistema di riferimento l'UTM - ETRF2000 - WGS84 fuso 32N in accordo con gli standard a livello internazionale.

Sono state determinate, inoltre, le coordinate geografiche nel sistema di riferimento cartografico piano (Est, Nord, Quota) WGS84 UTM 32.

la quota nelle misure GNSS essa è relativa all'altezza ellissoidica, e per passare alla quota ortometrica, ovvero l'informazione altimetrica di base per ogni attività ingegneristica, è stato utilizzato il software *ConverGO*.

Le due altezze sono legate dalla seguente relazione [S23]:

$$H \cong h - N$$

dove  $H$  è la *quota ortometrica* ovvero la distanza di un punto sulla superficie terrestre dal geode misurata lungo la linea di forza passante per il punto,  $h$  è l'*altezza ellissoidica*, cioè la distanza di un punto della superficie terrestre dall'ellissoide di riferimento misurata lungo la normale ellissoidica (significato geometrico) e  $N$  è detta *ondulazione del geode* (Figura 6-5).

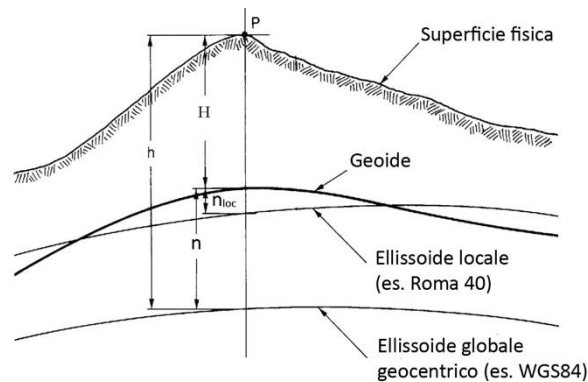


Figura 6-5 Quota ortometrica, altezza ellissoidica e ondulazione del geode [S23].

A partire dai vertici della rete d'inquadramento sono state eseguite delle misure topografiche della rete di appoggio creata all'interno del tunnel necessaria per la registrazione del rilievo LIDAR impiegando una stazione totale e un prisma circolare di precisione (Leica GPR121) (Figura 6-3); sono stati, infatti, collimati i vertici di coordinate note della rete di inquadramento precedentemente definiti per georeferenziare le misure effettuate con stazione totale (Figura 6-6).



Figura 6-6 Prisma circolare posizionato su treppiede topografico e vincolato ad una rete topografica interna alla galleria.

Inoltre, a partire dai vertici della poligonale creata mediante stazione totale, è stato misurato il centro di alcuni target retroriflettenti artificiali circolari con un raggio di 5 cm che sono stati disposti lungo le pareti del sottopasso. I target utilizzati per i rilievi laser scanning sono quelli abbinati al Laser scanner utilizzato che garantiscono una migliore individuazione (Figura 6-7). Tali target sono stati posizionati in modo tale da coprire maggiormente la parte di interesse del sottopassaggio e da avere almeno tre di essi in ciascuna scansione poiché necessari sia per l'unione sia per la georeferenziazione delle nuvole di punti [S28].

In strutture con sviluppo lineare considerevole, come nel caso studio, quali tunnel, strade e linee ferroviarie, è opportuno prevenire la propagazione di errori unendo tra loro le scansioni. Per questo è necessario vincolare le scansioni rispetto ad una rete topografica, detta rete di raffittimento, realizzata all'interno del tunnel stradale [S28]. La rete, infine, attraverso un software è stata compensata ai minimi quadrati ottenendo uno scarto quadratico medio (RMSE - *Root Mean Square*

*Error*) delle coordinate stimate inferiore ad 1 cm a partire dalle misure di angoli e distanze effettuate tramite stazione totale.



Figura 6-7 Esempio di target retroriflettente utilizzato durante i rilievi all'interno del tunnel per la registrazione e colorazione delle scansioni.

Lo strumento utilizzato per il rilievo LiDAR è un laser scanner a lungo raggio prodotto da RIEGL Ltd, modello VZ<sup>®</sup>-400i [S29] che emette rapidi impulsi laser in varie direzioni coprendo l'area di interesse e il cui principio di misura della distanza è basato sul *tempo di volo* "TOF" (Figura 6-8).

Il laser scanner RIEGL VZ<sup>®</sup>-400i largo 206 mm e alto 308 mm ha un peso di 9,7 kg.



Figura 6-8 Laser Scanner Riegl VZ-400i impiegato durante la fase di acquisizioni con antenna GNSS.

Il TLS impiegato è dotato di un'antenna GNSS posizionata sopra la testa che può essere utilizzata per georeferenziare le scansioni e di una piattaforma inerziale integrata nello strumento; quest'ultima consente la determinazione delle coordinate del punto di stazionamento e di stimare la posizione approssimata relativa tra una posizione di scansione e l'altra in tempo reale. Inoltre, sulla parte superiore del TLS è stata montata con un particolare supporto solidale allo strumento di misura una fotocamera digitale reflex esterna (Nikon D800<sup>®</sup>) con obiettivo a focale fissa (Nikon AF lenti Nikkor 20 mm) grazie alla quale è stato possibile acquisire immagini ad alta risoluzione (Figura 6-9). In questo modo in fase di post-processing, grazie a tali immagini, è stato possibile attribuire le informazioni di colore (RGB) di ciascun pixel alla nuvola di punti 3D [S25]. il VZ-400i è uno scanner rotante caratterizzato da un ampio campo visivo (FOV) di 100° (+60°/-40°) in verticale e 360° in orizzontale (panorama scanner) e con un range di acquisizione che varia da 0,5 m fino a 800 m.



Figura 6-9 Laser Scanner Riegl VZ-400i con antenna GNSS e camera digitale Nikon D800 montato su un treppiede leggero in carbonio utilizzato come supporto per un flusso di lavoro rapido e fluido nell'acquisizione dei dati.

L'accuratezza dello strumento è di 5 mm mentre la precisione è di 3 mm.

Il movimento di scansione *orizzontale* della testa che ruota attorno all'asse Z è molto lento e si chiama "Frame Scan" con angolo di scansione  $\vartheta$  che varia da  $0^\circ$  fino a un massimo di  $360^\circ$ , mentre quello verticale è molto veloce ed è dovuta alla rotazione dello specchio e alla cosiddetta "Scan Line" con un angolo di scansione  $\phi$  fino a  $100^\circ$  ( $+60^\circ/-40^\circ$ ) (Figura 6-10). Lo specchio all'interno dello scanner può quindi oscillare tra  $60^\circ$  sopra l'orizzontale ( $0^\circ$ ) e  $-40^\circ$  (o 40 gradi sotto l'orizzontale,  $0^\circ$ ). Entrambi possono essere scelti dall'utente [S26].

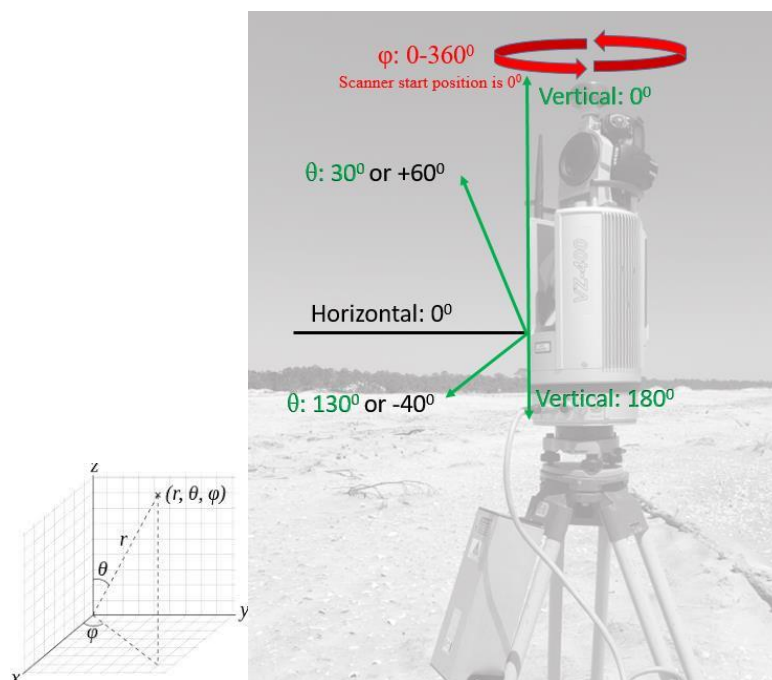


Figura 6-10 Campo visivo (FOV) del Laser Scanner VZ-400i nell'immagine a destra. Nell'immagine a sinistra gli angoli  $\theta$  e  $\phi$ . [S26].

La sua risoluzione angolare è di circa 6 mm ad una distanza di 10 metri dal punto di stazione [S24].

Il TLS RIEGL VZ-400i ha una divergenza del raggio laser di 0,35 mrad (corrisponde ad un aumento di 35 mm di diametro del fascio a 100 m di portata) e un diametro iniziale del fascio di 7 mm; il raggio

laser è un fascio cilindrico di fotoni che devia leggermente quando viene emesso dal laser e allontanandosi il fascio inizia ad allargarsi e ad aumentare il suo diametro.

|  |  |         |  |                     |
|--|--|---------|--|---------------------|
| Laser Pulse Repetition Rate PRR (peak) <sup>2)3)</sup>                                   | 100 kHz  | 300 kHz | 600 kHz  | 1200 kHz            |
| Effective Measurement Rate (meas./sec) <sup>2)</sup>                                     | 42,000   | 125,000 | 250,000  | 500,000             |
| Max. Measurement Range <sup>4)</sup>   |  |         |  |                     |
| natural targets $\rho \geq 90\%$   | 800 m  | 480 m   | 350 m  | 250 m               |
| natural targets $\rho \geq 20\%$   | 400 m  | 230 m   | 160 m  | 120 m               |
| Minimum Range  | 1.5 m  | 1.2 m   | 0.5 m <sup>5)</sup>  | 0.5 m <sup>5)</sup> |
| Max. Number of Targets per Pulse <sup>6)</sup>   | 15   | 15      | 8  | 4                   |
| <b>Scanner Performance</b>   | <i>Vertical (Line) Scan</i>  |         | <i>Horizontal (Frame) Scan</i>   |                     |
| Scan Angle Range   | total 100° (+60° / -40°)   |         | max. 360°  |                     |
| Scanning Mechanism   | rotating multi-facet mirror  |         | rotating head  |                     |
| Scan Speed   | 3 lines/sec to 240 lines/sec   |         | 0°/sec to 150°/sec <sup>12)</sup>  |                     |
| Angular Step Width <sup>11)</sup> $\Delta \theta$ (vertical), $\Delta \phi$ (horizontal) | 0.0007° $\leq \Delta \theta \leq 0.6^\circ$<br>between consecutive laser shots                 |         | 0.0015° $\leq \Delta \phi \leq 0.62^\circ$<br>between consecutive scan lines |                     |
| Angle Measurement Resolution   | better 0.0007° (2.5 arcsec)  |         | better 0.0005° (1.8 arcsec)  |                     |
| Orientation Sensors  | integrated 3-axis accelerometer, 3-axis gyroscope,<br>3-axis magnetometer (compass), barometer |         |  |                     |
| GNSS Receiver  | integrated L1, concurrent reception of GPS, GLONASS, Beidou                                    |         |  |                     |
| Laser Plummet  | integrated   |         |  |                     |
| Internal Sync Timer  | integrated, for real-time synchronized time stamping of scan data                              |         |  |                     |
| Scan Sync (optional)   | scanner rotation synchronization for operating several scanners                                |         |  |                     |
| Waveform Data Output (optional)  | providing digitized echo signal information for specific target echoes                         |         |  |                     |
| Cloud Storage  | Amazon S3, FTP-Server, Microsoft Azure   |         |  |                     |
| Automatic On-board Registration  | automatic scan data registration as background process   |         |  |                     |

Figura 6-11 Caratteristiche tecniche principali del laser scanner impiegato: estratto da scheda tecnica del Laser Scanner RIEGL VZ®-400i: [S24].

Il TLS RIEGL VZ®-400i [S24] è dotato di un sensore di orientamento per il “*pose estimation*” e un ricevitore GNSS interno (L1) per l'ora GPS e la posizione globale (Figura 6-11). Può essere modificato con un ricevitore esterno di terze parti di fascia alta che deve essere montato sulla parte superiore dello strumento per supportare una precisa registrazione dei dati di scansione globale. Per un funzionamento regolare sul campo, i dati GNSS vengono trasferiti allo scanner *RIEGL VZ-400i* (dotato di interfaccia dedicata) tramite connessione Bluetooth o cavo. Il GPS esterno fornisce un segnale aggiuntivo PPS (*Pulse Per Second*) che segna il cambio di secondo. Quest'ultimo viene confrontato con l'ora interna dello scanner e l'ora GPS viene inserita nel flusso di dati.

Nel caso in esame con il Laser Scanner *RIEGL VZ-400i* posizionato su un treppiede ad una velocità di acquisizione di circa 250000 punti/s (frequenza di acquisizione di 600 KHz con una distanza di misura massima di 350 m) sono state eseguite 37 scansioni su entrambe le semicarreggiate con l'obiettivo di creare un modello tridimensionale completo del sottopasso del Lingotto; in particolare, dal 7 giugno al 11 giugno 2021 nella semicarreggiata in direzione da est a ovest (da corso Unità d'Italia verso corso Giambone) (Figura 6-12) e dal 28 giugno al 2 luglio 2021 nella semicarreggiata in direzione opposta.



Figura 6-12 Posizionamento del Laser scanner su treppiede nella semicarreggiata ovest-est (da corso Giambone a Corso Unità d'Italia ScanPos01).

Dato che la densità dei punti acquisiti con tecnica di rilievo LiDAR non è costante ma è dipendente dalla distanza, le posizioni di scansione sono state distanziate di circa 30 metri per una completa copertura del tunnel. In tal modo l'angolo di acquisizione per ogni punto di acquisizione non risulta essere troppo inclinato rispetto alle superfici del tunnel [S28] garantendo così un certo livello di dettaglio. Inoltre, tenendo conto del FOV dello strumento impiegato e della presenza del New Jersey presente al centro delle due semicarreggiate (ostruzione permanente), le posizioni di scansione sono state alternate lungo le due corsie di ciascuna semicarreggiata per poter ricostruire in modo completo sia la volta che la pavimentazione. In aggiunta, dato che l'obiettivo iniziale del rilievo era lo studio delle condizioni della volta del tunnel, ogni scansione è stata eseguita inclinando lo strumento di  $30^\circ$  rispetto all'orizzontale (Figura 6-13). Ogni acquisizione ha richiesto circa quindici minuti per la scansione e circa due minuti per lo scatto delle foto.



Figura 6-13 Posizionamento del laser scanner all'interno del sottopasso Lingotto (ScanPos005) inclinato di 30° rispetto all'orizzontale. In alto a destra dell'immagine vedere sulla parete del tunnel un target retroriflettente (T1006).

Per il seguente lavoro di tesi si è scelto di creare un modello digitale della prima parte del sottopasso compreso tra Via Nizza e la rotonda Lingotto. Per fare ciò, sono stati forniti i dati LiDAR delle prime 13 scansioni riferite al tratto del sottopasso Lingotto scelto come caso studio della seguente ricerca e le relative misure topografiche della rete di appoggio. Tali dati, con elevata accuratezza e precisione, sono stati raccolti sul campo in modo molto rigoroso insieme ai dati GNSS [S30].

In *Figura 6-14* viene riportato lo schema delle posizioni di scansione ed in rosso la nuvola di punti del caso studio.

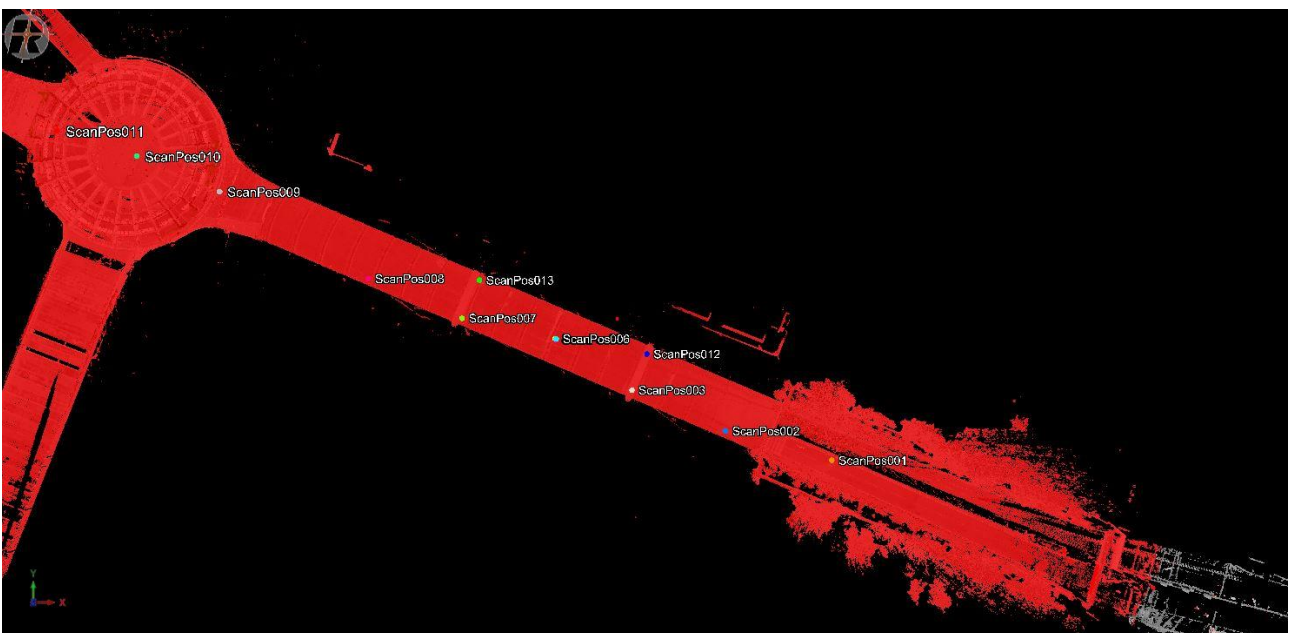


Figura 6-14 Schema delle posizioni di scansione e in rosso le point clouds esportate per creare il modello 3D del sottopasso.

I dati Laser scanner sono stati elaborati nel laboratorio di Geomatica del Politecnico di Torino utilizzando il software specifico distribuito da RIEGL Ltd RiSCAN PRO® in una prima fase e successivamente il software free e open-source *CloudCompare* (Figura 6-15).

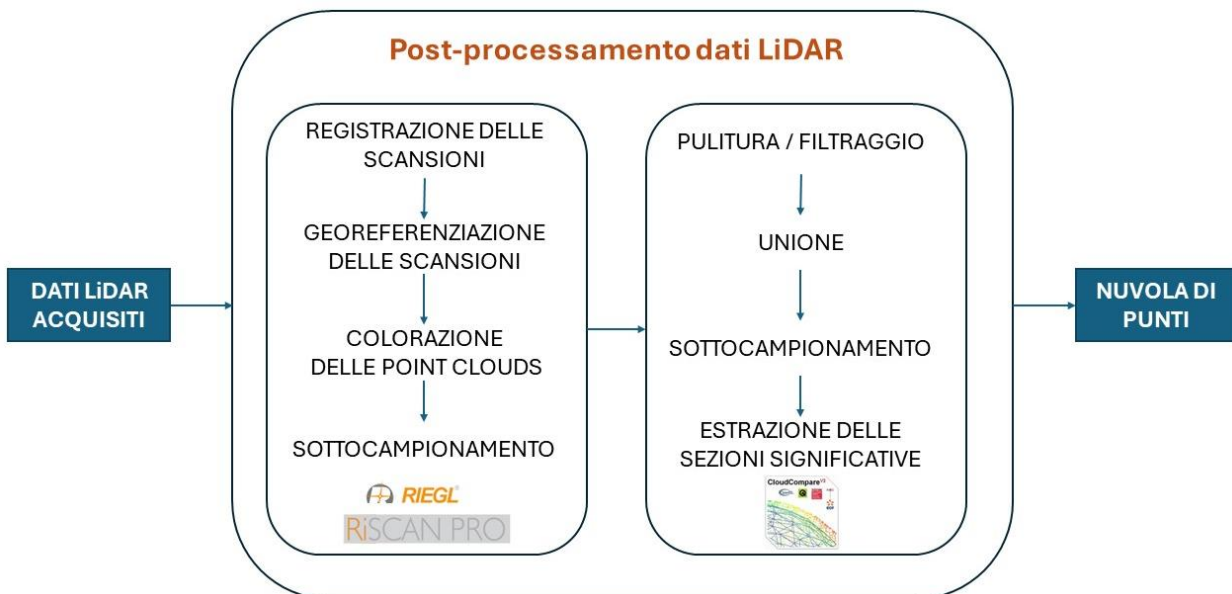


Figura 6-15 Workflow seguito per il processamento dei dati LiDAR.

In particolare, RiSCAN PRO® è il pacchetto software dedicato all'elaborazione dei dati acquisiti dagli strumenti laser scanner RIEGL. Consente all'operatore del sensore di imaging 3D di eseguire un gran numero di attività, tra cui la configurazione del sensore, il controllo dello strumento durante l'acquisizione dei dati, la visualizzazione dei dati, l'elaborazione dei dati e l'archiviazione dei dati [S27]. Grazie a tale software le singole scansioni sono state georeferenziate utilizzando i corrispondenti dati GNSS, allineate correttamente utilizzando algoritmi di regolazione detti "multi station adjustment" e sono stati assegnati i valori RGB e di riflettività [S30]. I dati infine sono stati esportati come files ASCII dal software RiSCAN PRO®. Quest'ultimo è il software operativo e di visualizzazione per i laser scanner VZ della RIEGL che consente di orientare, unire e visualizzare le scansioni in campo.

Tale software è orientato al progetto. Un progetto è memorizzato all'interno di un'unica struttura di directory contenente tutti i dati di scansione, le informazioni di registrazione, i descrittori aggiuntivi e gli output di elaborazione. I dati relativi a ogni posizione di scansione sono contenuti in una specifica cartella che include oltre alle scansioni (da 1 a un massimo di 3 per ciascuna ScanPosition), le immagini digitali acquisite simultaneamente dallo scanner, i dati GNSS, le coordinate delle nuvole di punti e dei punti di collegamento e tutte le matrici di trasformazione necessarie per convertire i dati di più scansioni in un sistema di coordinate comune ben definito.

Di seguito è riportato l'elenco dei punti della rete di appoggio (marker) riferito al tratto in esame "coordinate tutti i punti\_def\_lato ovest.txt" con le relative coordinate calcolate nel sistema di riferimento scelto (Tabella 6-1).

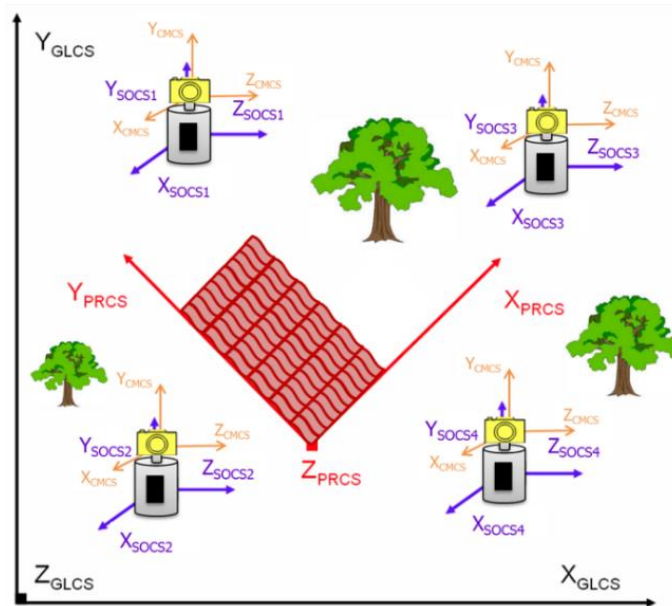


| ID Target | N [m]        | E [m]         | H [m]     |
|-----------|--------------|---------------|-----------|
| T1000     | 394837,68364 | 4986826,67226 | 231,75820 |
| T1001     | 394748,01434 | 4986866,39078 | 227,36721 |
| T1003     | 394625,08188 | 4986913,49937 | 228,08180 |
| T1004     | 394643,84648 | 4986905,10183 | 228,76349 |
| T1005     | 394663,62477 | 4986896,25985 | 228,27190 |
| T1006     | 394679,19873 | 4986889,28184 | 228,85747 |
| T1007     | 394738,88478 | 4986862,63474 | 228,54631 |
| T1008     | 394726,20338 | 4986868,30430 | 228,10968 |
| T1009     | 394713,71035 | 4986873,87625 | 228,85364 |
| T1010     | 394699,86770 | 4986880,06266 | 227,92107 |
| T1011     | 394689,86109 | 4986899,83106 | 229,33201 |
| T1012     | 394665,28442 | 4986910,94614 | 229,36761 |
| T1013     | 394653,23308 | 4986916,31011 | 229,50614 |
| T1014     | 394662,29812 | 4986904,66139 | 228,27636 |
| T1015     | 394584,64690 | 4986945,78354 | 228,86299 |
| T1016     | 394595,76683 | 4986935,60330 | 230,13898 |
| T1017     | 394546,53162 | 4986946,22679 | 229,67508 |
| T1018     | 394550,35315 | 4986954,21775 | 229,33013 |
| T1019     | 394647,67086 | 4986904,10104 | 229,24083 |
| T1020     | 394829,62237 | 4986830,23856 | 228,79899 |
| T1021     | 394702,25877 | 4986895,02116 | 228,64141 |
| T1022     | 394739,45872 | 4986878,13903 | 227,93566 |
| T1023     | 394715,38479 | 4986889,14328 | 228,28770 |
| T1024     | 394730,81577 | 4986882,24355 | 227,90916 |
| T1025     | 394747,14342 | 4986874,93698 | 228,74739 |
| T1026     | 394593,81129 | 4986958,58038 | 231,16615 |
| T1027     | 394570,03309 | 4986969,65659 | 228,17544 |
| T1028     | 394559,66296 | 4986966,65859 | 228,59259 |
| T1029     | 394550,23426 | 4986953,71346 | 229,33477 |
| T1030     | 394551,35714 | 4986964,47566 | 230,17591 |
| T1031     | 394516,99216 | 4986977,12343 | 229,67890 |
| T1032     | 394546,07544 | 4986945,98287 | 229,69516 |
| T1033     | 394564,84030 | 4986921,93563 | 229,78872 |
| T1034     | 394586,27873 | 4986923,93088 | 228,22226 |
| T1035     | 394629,02065 | 4986912,40856 | 229,58103 |
| T1036     | 394647,59295 | 4986904,03951 | 229,06264 |
| P200      | 394392,50043 | 4987024,77776 | 227,00881 |
| T2000     | 394415,69491 | 4987015,13069 | 228,77875 |
| T2001     | 394600,26608 | 4986943,45032 | 229,57812 |
| T2002     | 394550,19656 | 4986954,16561 | 230,03539 |
| T2004     | 394561,76449 | 4986941,82808 | 228,88921 |
| T2005     | 394561,40612 | 4986945,91957 | 228,43750 |

Tabella 6-1 Coordinate di tutti i target (tie-points) relativi al primo tratto del sottopasso Lingotto lato ovest.

Le scansioni vengono sempre eseguite da diversi punti di vista o posizioni al fine di ottenere un set di dati più o meno completo della superficie dell'oggetto senza lacune e per evitare le zone d'ombra. Quando si avvia un nuovo progetto, cioè si avvia una nuova campagna di acquisizione dati, l'utente inizializza una nuova posizione di scansione prima di acquisire dati dallo scanner. Ogni scansione è caratterizzata dal suo sistema di coordinate locale con origine nel centro strumentale dello scanner.

La posizione di scansione contiene, pertanto, tutti i dati acquisiti in quella specifica configurazione dello scanner. RiSCAN PRO utilizza diversi sistemi di coordinate [S27]. In particolare, quello relativo allo scanner è chiamato "Scanner's Own Coordinate System" (SOCS); il sistema di coordinate definito dall'utente è chiamato "Project Coordinate System" (PRCS); il sistema di coordinate in cui è inglobato il PRCS è il "Global Coordinate System" (GLCS); infine il sistema di coordinate della telecamera montata sulla parte superiore dello scanner che fornisce immagini ad alta risoluzione è il "Camera Coordinate System" (CMCS). In *Figura 6-16* viene mostrato un esempio di schema generale dei quattro sistemi di coordinate GLCS, PRCS, SOCS e CMCS e come si relazionano tra loro.



*Figura 6-16* Esempio generico con i quattro sistemi di coordinate GLCS, PRCS, SOCS e CMCS [S25].

Nell'esempio, quattro posizioni di scansione (SOCS 1-4) vengono registrate insieme per creare le coordinate generali del progetto (PRCS). Quindi i dati vengono applicati alla nuvola di punti e viene creato il GLCS in modo che la nuvola di punti sia georeferenziata. L'oggetto è un edificio visto dall'alto "Bird's view". Un sistema di coordinate del progetto è definito con l'asse  $Y_{PRCS}$  parallelo al lato lungo dell'edificio e l'origine del PRCS che coincide con un angolo dell'edificio. PRCS deve essere un sistema destrorso. GLCS nell'esempio è un sistema sinistrorso, ad esempio, nord, est e quota. Ogni posizione di scansione è caratterizzata dal proprio sistema di coordinate locali (SOCS) raffigurato dagli assi  $X_{SOCSi}$ ,  $Y_{SOCSi}$  e  $Z_{SOCSi}$ , cioè dalla posizione e dall'orientamento dello scanner all'interno del sistema di coordinate del progetto [S25].

Lo *Scanner's Own Coordinate System* (SOCS) è il sistema di coordinate in cui lo scanner fornisce i suoi dati grezzi. La *Figura 6-17* mostra il sistema di coordinate (SOCS) di un TLS RIEGL LMS-Z210. I dati di ogni sensore di imaging laser RIEGL 3D contengono per ogni misurazione laser informazioni sulla geometria (coordinate cartesiane  $x$ ,  $y$ ,  $z$  o coordinate polari  $r$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ ) e descrittori aggiuntivi (riflettività, informazioni sul colore). Quindi l'output di un sensore di imaging laser RIEGL 3D può essere considerato come una nuvola di punti organizzata con descrittori di vertice aggiuntivi nel sistema di coordinate dello scanner.

*Project Coordinate System* (PRCS) è il principale sistema di coordinate utilizzato all'interno di RiSCAN PRO. Ad esempio, PRCS può essere un sistema di coordinate già esistente nel sito di scansione, ad esempio un sistema di coordinate di un manufatto o di un impianto.

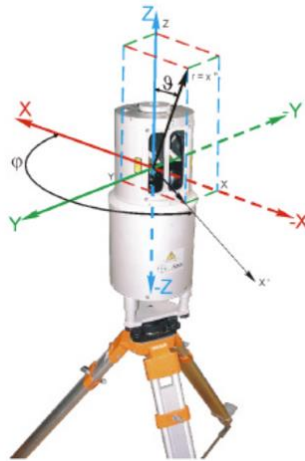


Figura 6-17 Sistema di coordinate del RIEGL LMS-Z360 Laser scanner Scanner's Own Coordinate System (SOCS) [S27].

La posizione e l'orientamento del sensore possono generalmente essere descritti da 6 parametri (3 per la posizione, 3 per la rotazione) o da una matrice di trasformazione. Il software RiSCAN PRO, per trasformare i dati dal SOCS nel sistema di coordinate del progetto (PRCS) moltiplica tutti i suoi punti con una matrice 4x4 [19]. Quest'ultima è definita matrice "Sensor's Orientation and Position matrix" ( $M_{SOP}$ ). La matrice è costituita da 9 parametri che riflettono la rotazione (da  $r_{11}$  a  $r_{33}$ ) e 3 parametri per la traslazione (da  $t_1$  a  $t_3$ ). L'uso di coordinate omogenee permette il calcolo della rotazione e della traslazione in una singola moltiplicazione matriciale. Il vettore di traslazione è la posizione degli scanner e i vettori colonna  $(r_{1i} \ r_{2i} \ r_{3i})^T$  sono le direzioni degli assi delle coordinate locali in PRCS.

Ogni posizione di scansione contiene i dati di scansione presi in questa posizione di scansione, memorizzati nel formato di dati binario dello scanner con estensione 3dd. Per trasformare i dati da SOCS in PRCS, i punti dati vengono semplicemente moltiplicati per la matrice SOP ( $M_{SOP}$ ) della posizione di scansione.

Nel caso in cui un punto dato  $P$  debba essere trasformato da una specifica posizione di scansione  $ScanPos_i$  (Punto  $P_{SP_i}$ ) nel GLCS, occorre prima moltiplicare con la matrice  $M_{SOP}$  della posizione di scansione per entrare nel PRCS e successivamente moltiplicare il punto  $P_{PR}$ , con la matrice "Project's Orientation and Position" ( $M_{POP}$ ) per passare dal PRCS al GLCS. Infine, si otterrà il punto  $P_{GL}$ , georeferenziato. Lo schema seguente (Figura 6-18) mostra con un esempio questo procedimento [S25].

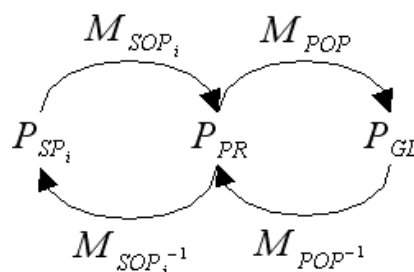


Figura 6-18 Lo schema mostra la trasformazione da diversi sistemi di coordinate SOCS, PRCS, GLCS e viceversa [6.6].

## 6.2 Elaborazione delle nuvole di punti mediante software RiSCAN PRO®

Il software RiSCAN PRO® ha diverse proprietà che vanno dalla registrazione, al filtraggio dei dati, alla triangolazione, alla creazione di ortofoto, al calcolo del volume degli oggetti rappresentati da nuvole di punti o mesh e infine all'animazione della forma dell'oggetto rilevato [S25]. Il processo di

registrazione delle varie “ScanPositions” nel PRCS è la determinazione della rispettiva matrice SOP [19]. La procedura per effettuare l’allineamento e la georeferenziazione delle scansioni è necessaria per ottenere un'unica nuvola di punti e viene eseguita con tre diversi metodi come qui descritto [S25]:

1. attraverso le coordinate dei punti di collegamento (*tie-points*) locali o globali sia i dati GNSS;
2. attraverso un algoritmo chiamato “*multi station adjustment*” per l’ottimizzazione geometrica dell’allineamento tra le scansioni basato su una versione modificata del classico algoritmo dell’Iterative Closest Point (ICP);
3. attraverso la procedura chiamata “*back-sighting orientation*”.

Nel seguente lavoro di ricerca sono stati utilizzati i primi due metodi. In particolare, per il “merging” dei dati LiDAR sono stati posti numerosi target retroriflettenti lungo le pareti del tunnel. Le coordinate dei target sono state misurate e acquisite con una stazione totale. I dati sono riportati nell'elenco dei *tie-points* PRCS (Tabella 6-1). L'unione delle scansioni e quindi la registrazione delle scansioni nel sistema di coordinate del progetto è stata effettuata in una prima fase sul campo al fine di verificare immediatamente la copertura dei dati e successivamente in laboratorio [S27] grazie a punti di coordinate note.

Di seguito vengono riportati le fasi del processo di trattamento dei dati LiDAR eseguite in laboratorio con il software RiSCAN PRO® (Figura 6-19).

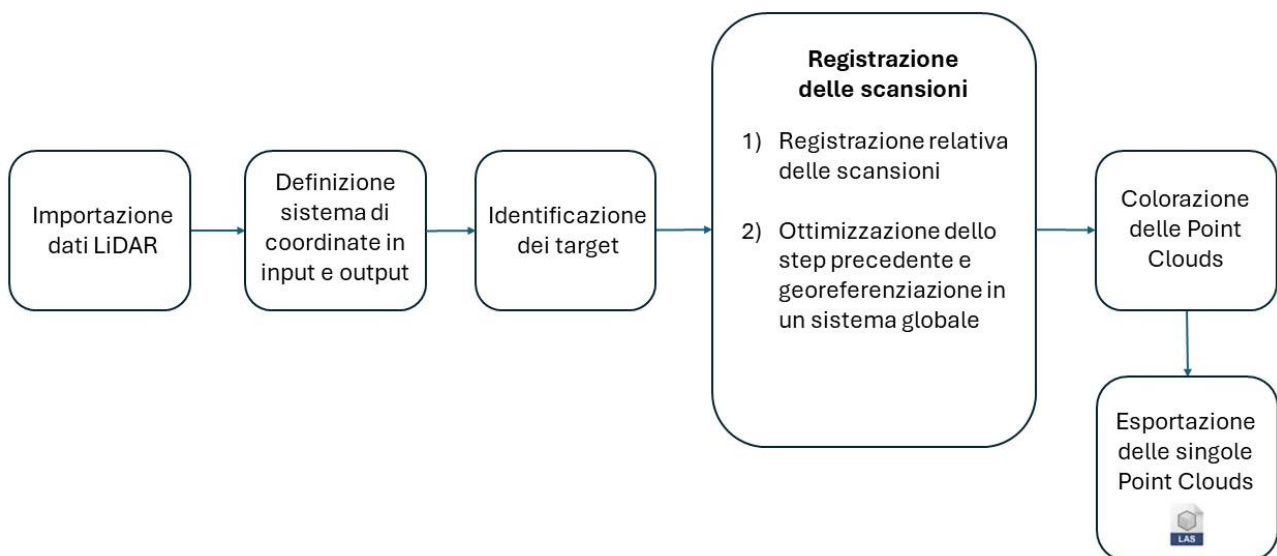


Figura 6-19 Schema di elaborazione dati LiDAR con software

### 6.3 Georeferenziazione delle scansioni tramite software RiSCAN PRO®

Le fasi del processo di editing delle nuvole di punti in RiSCAN PRO® sono:

1. importazione dei dati LiDAR (caricamento delle singole scansioni e delle relative immagini);
2. definizione dei sistemi di coordinate caratterizzanti i dati di input e di output;
3. visualizzazione dei dati in vista 3D;
4. identificazione dei target retroriflettenti e collimazione dei punti con le coordinate note in ciascuna scansione (un punto deve essere presente in almeno 2/3 scansioni);

5. registrazione delle scansioni utilizzando i target (marker) e punti di riferimento (controllo residui/errori max 2 cm);
6. eliminare i punti con errori elevati (ignorare) e registrare nuovamente;
7. calibrazione della fotocamera e colorazione delle nuvole di punti;
8. unione delle nuvole di punti georiferite e colorate in un'unica nuvola di punti;
9. esportazione della nuvola di punti.

### 6.3.1 Importazione dei dati LiDAR

I dati LiDAR relativi alle singole scansioni sono stati importati all'interno del software RiSCAN PRO®. In particolare, sono state caricate contemporaneamente tutte e 13 le cartelle relative a ciascuna posizione di scansione all'interno della directory di progetto. Ogni cartella contiene sia le scansioni che le relative immagini. Sono state quindi trascinate le singole scansioni nell'area di lavoro dove è stato possibile scegliere il tipo di visualizzazione e la vista 3D.

### 6.3.2 Definizione dei sistemi di coordinate caratterizzanti i dati di input e di output

La prima fase di elaborazione dati laser con RiSCAN PRO® relativi alle 13 scansioni scelte consiste nel settare i parametri legati ai sistemi di coordinate adottati per i dati in input e i dati in output. Per il caso studio è stato utilizzato un sistema di coordinate UTM - ETRF2000 - WGS84 fuso 32N sia per le coordinate dei punti di input che le coordinate dei punti in output (Figura 6-20).

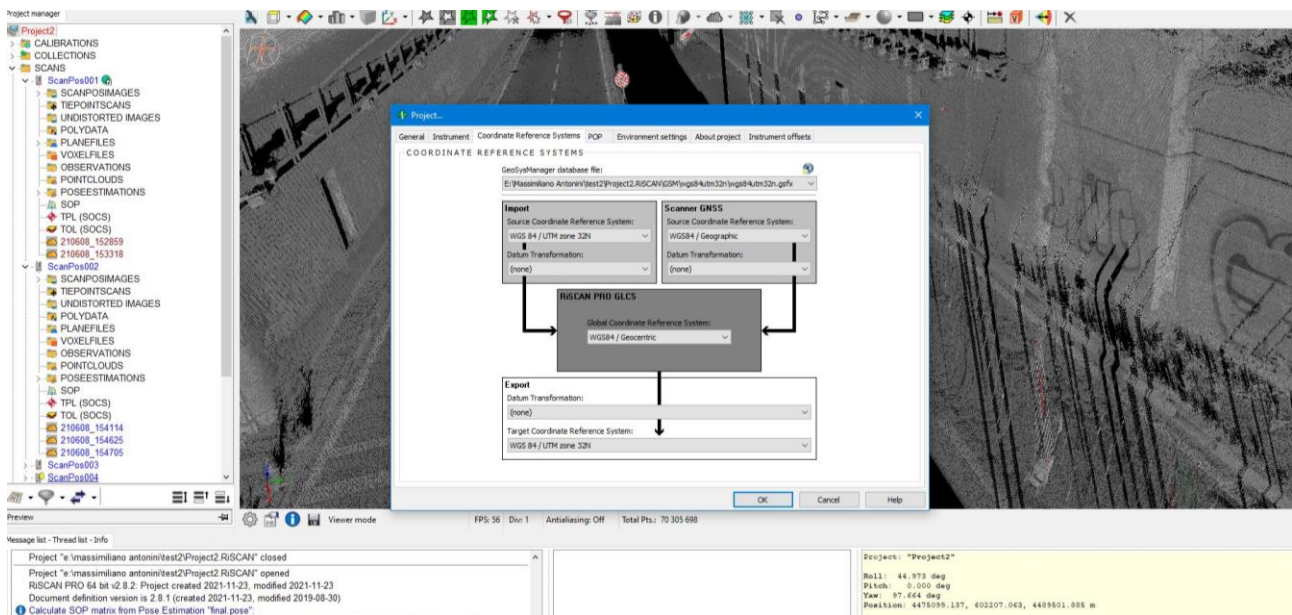


Figura 6-20 Vista dell'interfaccia del software RiSCAN PRO: struttura ad albero a sinistra con le 13 ScanPos<sub>00i</sub> caricate e definizione dei sistemi di coordinate di riferimento per i dati in input e in output nel software RiSCAN PRO®.

### 6.3.3 Visualizzazione dei dati in vista 3D

Una volta importate le singole scansioni e definito il sistema di riferimento è stato eseguito un controllo con vista dall'alto ("Bird's eye view") della corretta collocazione spaziale delle posizioni di scansione. In figura seguente (Figura 6-21) viene riportato lo schema di acquisizione per il tratto di galleria in esame con le posizioni di scansione (ScanPositions indicate con ScanPos<sub>00i</sub>) dalla 1 alla 13 in RiSCAN PRO®.

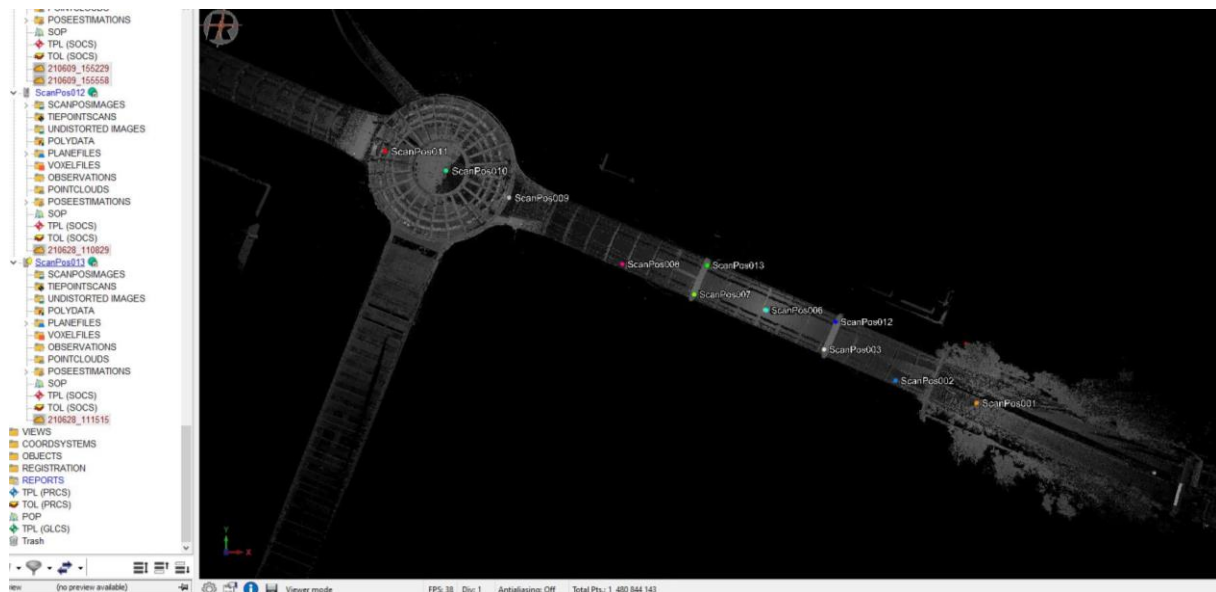


Figura 6-21 Vista dell'interfaccia del software RISCAN PRO® e visualizzazione dall'alto delle posizioni di scansione (ScanPos00i) relative al tratto di tunnel del caso studio.

#### 6.3.4 Identificazione dei target retroriflettenti

La fase successiva di elaborazione dati è l'identificazione dei target retroriflettenti e l'associazione delle coordinate reali misurate con tecnica topografica; ciò serve sia per la registrazione relativa delle scansioni che per la loro georeferenziazione nel sistema di coordinate assoluto. Il processo di registrazione in RISCAN PRO si basa sui tie-point. I tie-point sono gestiti da liste di punti dette "tie-point list" (TPL). I tie-point sono definiti da *target retroriflettenti* che appaiono chiaramente nei dati di intensità dei dati di scansione e che possono anche essere localizzati con precisione tramite stazioni totali. Nel caso in esame i dati sono stati ottenuti misurando la posizione dei *tie-points* o *marker* con una stazione totale. In generale, il tie-point coincide con il centro di un target retroriflettente [S27].

Nonostante il software sia in grado di eseguire automaticamente la ricerca dei target impostando la tipologia e la dimensione (retroriflettente circolare da 5 mm della RIEGL) si è scelto di procedere manualmente dato l'elevato rumore presente nelle varie scansioni dovuto principalmente al passaggio di veicoli in transito e delle loro luci nella semicarreggiata opposta all'interno del sottopassaggio durante le fasi di misura e acquisizione (Figura 6-22).

Nella Figura 6-22 è riportata una parte della scansione acquisita dalla posizione di scansione ScanPos001 nei pressi dell'imbocco est del sottopasso nella semicarreggiata da Corso Unità d'Italia a Corso Giambone e due marker individuati T1000 e T1001. Inoltre, si può notare, come il New Jersey al centro sia da ostacolo e quindi limiti il cono di vista del laser scanner; difatti, solo una parte della pavimentazione della semicarreggiata opposta viene presa nella scansione.

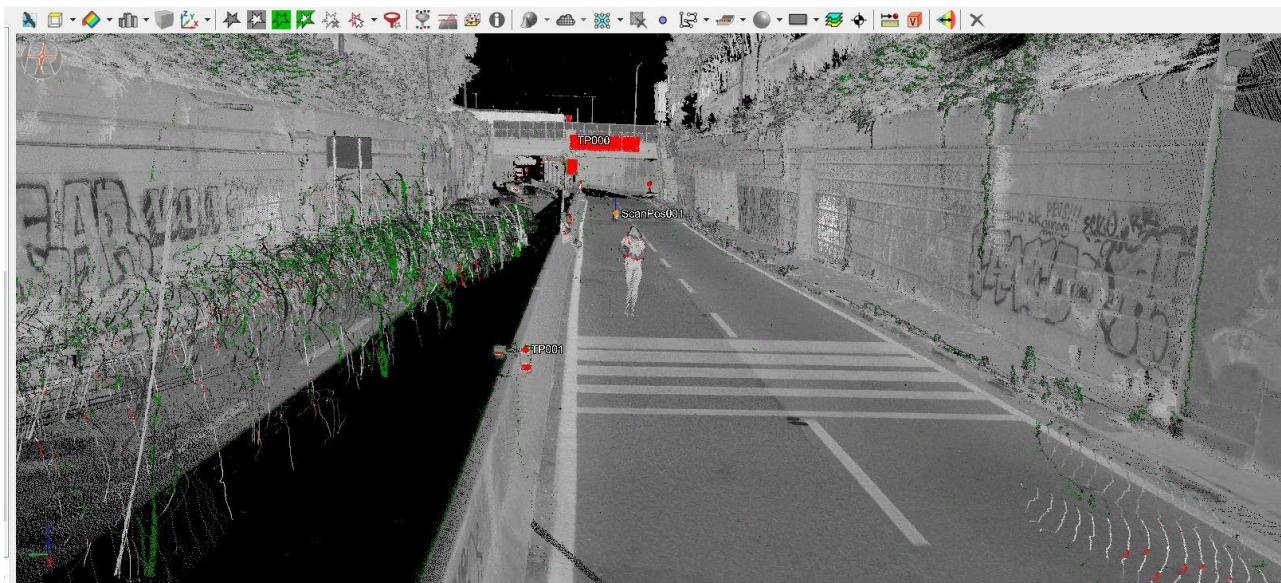


Figura 6-22 Individuazione dei target retroriflettenti nella ScanPos001 in RiSCAN PRO®.

Sono stati quindi individuati e collimati tutti i punti con le coordinate note in ciascuna scansione in RiSCAN PRO® aiutandosi con delle monografie dei target forniti (Figura 6-23).



Figura 6-23 Esempio di monografia di un target (T1001) utilizzata per l'individuazione dei target nelle varie scansioni.

Per registrare ogni singola posizione di scansione (ScanPos<sub>i</sub>) nel sistema di coordinate del progetto sono stati individuati tutti i target retroriflettenti visibili nella specifica posizione di scansione (Figura 6-24).

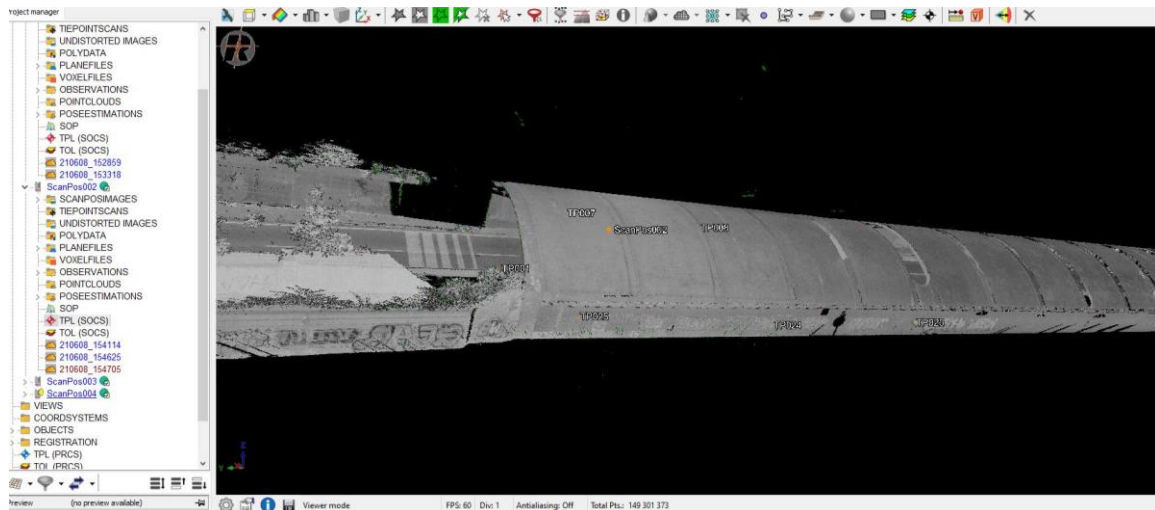


Figura 6-24 Visualizzazione della ScanPos002 e posizione dei target riflettenti individuati T1000, T1001, T1007, T1008, T1023, T1024 e T1025 in RiSCAN PRO®.

È stato creato quindi un elenco nella tabella dei *tie-points* nel sistema SOCS TPL(SOCS) (*Tie Point List - Scanner's Own Coordinate System*) nella quale sono stati rinominati e sono stati trovati i collegamenti “*find corresponding points*” con i tie-point presenti nel sistema PRCS.

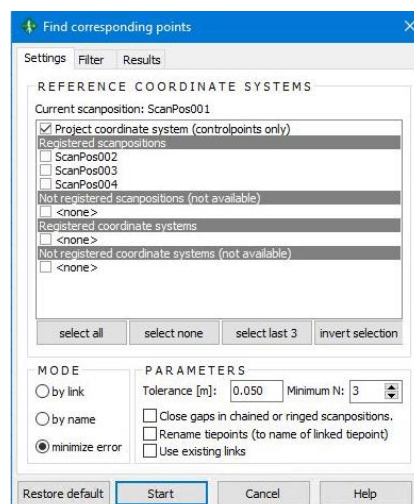


Figura 6-25 Finestra di dialogo per la registrazione tra le scansioni.

Le modalità all’interno del software per creare i link tra i punti a coordinate note e i punti individuati nelle scansioni sono: “by link”, “by name” o “minimize error” (Figura 6-25). Nel caso in esame si è scelta la modalità “minimize error” e sono stati impostati i parametri legati alla tolleranza (0,05 m) e il numero minimo “Minimum N” di target in ogni scansione pari a 3. In questo modo è stato possibile registrare le scansioni tra loro (Figura 6-25) e tutte le posizioni di scansione hanno un sistema di coordinate comune (PRCS). Sono state trovate diverse soluzioni. Tra le varie soluzioni prodotte dal software è stata scelta la migliore, in genere la prima, ovvero quella con il valore più basso di deviazione standard dei residui e più alto numero possibile di “corresponding points”. Nell’individuazione dei target retroriflettenti si è cercato di garantire un numero minimo di punti pari a 3 per scansione e la presenza di un punto comune in almeno 2/3 scansioni vicine. Inoltre, per consentire l’allineamento delle scansioni, è stato necessario assegnare a ciascun target il nome corretto in ogni scansione e controllare il link creato.





Figura 6-26 ScanPos003 e individuazione dei target riflettenti T1009, T1021, T1022, T1023 e T1024 in RiSCAN PRO®.

| Name  | Link     | RefCount | Finescan | RefType | Quality [%] | Size | Points | Ampl. | Reflec. | X       | Y      | Z      | Range   | θ       | φ      | ΔX     | ΔY |
|-------|----------|----------|----------|---------|-------------|------|--------|-------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|----|
| T1009 | T1009    | 0        |          |         | 0.000       | 0    | 35.830 | 2.98  | -0.787  | 4.933   | 1.779  | 5.302  | 78.402  | 99.952  | -0.009 | -0.002 | -0 |
| T1021 | PRCS_007 | 0        |          |         | 0.000       | 0    | 50.240 | 21.77 | -6.017  | -16.707 | -7.387 | 19.233 | 112.598 | 250.193 | -0.002 | 0.003  | -0 |
| T1022 | T1022    | 0        |          |         | 0.000       | 0    | 18.210 | -7.58 | -18.764 | 22.098  | -6.178 | 29.641 | 102.031 | 130.336 | 0.012  | -0.005 | 0  |
| T1023 | PRCS_006 | 0        |          |         | 0.000       | 0    | 59.590 | 28.76 | -10.490 | -3.042  | -7.081 | 13.017 | 122.955 | 196.170 | 0.011  | -0.004 | 0  |
| T1024 | T1024    | 0        |          |         | 0.000       | 0    | 51.350 | 23.46 | -15.834 | 13.027  | -6.733 | 21.581 | 108.180 | 140.555 | -0.017 | 0.010  | -0 |

Figura 6-27 Tabella dei TPL (SOCS) per la ScanPos003 individuati e con i relativi collegamenti "Corresponding tie-points" con calcolo della deviazione standard in RiSCAN PRO®.

## 6.4 Registrazione delle nuvole di punti

### 6.4.1 Registrazione delle scansioni

La fase successiva è la registrazione relativa e la georeferenziazione delle scansioni; la procedura standard seguita dal software RiSCAN PRO® consiste in due step:

Il primo step, detto "Automatic Registration 2", consiste in una registrazione relativa delle scansioni in modo semi-automatico tenendo conto dei tie point creati. Questa tecnica di registrazione utilizza degli elementi come dei cubi, detti *Voxel*, la cui dimensione fisica in metri è correlata al tipo di contesto in cui viene eseguito il rilievo. Questa procedura di *avvicinamento* e *allineamento* delle scansioni tra loro si basa sul cercare le affinità tra i voxel tra le varie nuvole di punti acquisite. Per una migliore stima dei punti di stazionamento con laser scanner, i target selezionati nelle varie scansioni sono stati utilizzati come ulteriori informazioni per la registrazione relativa tra le scansioni.

Sono stati settati i parametri legati alle caratteristiche dell'ambiente oggetto di studio; nel caso in esame è stato scelto un ambiente interno e ampio (*indoor large – voxel size 0,5 m*).

Inoltre, quando si lavora in ambienti in cui è difficile identificare particolari caratteristiche sulle superfici o in ambienti la cui geometria è ripetitiva in una determinata direzione, come nel caso studio scelto di un sottopassaggio (Figura 6-28), è necessario ricorrere a dei punti di coordinate note. Questi punti sono stati poi utilizzati nel secondo step di registrazione.

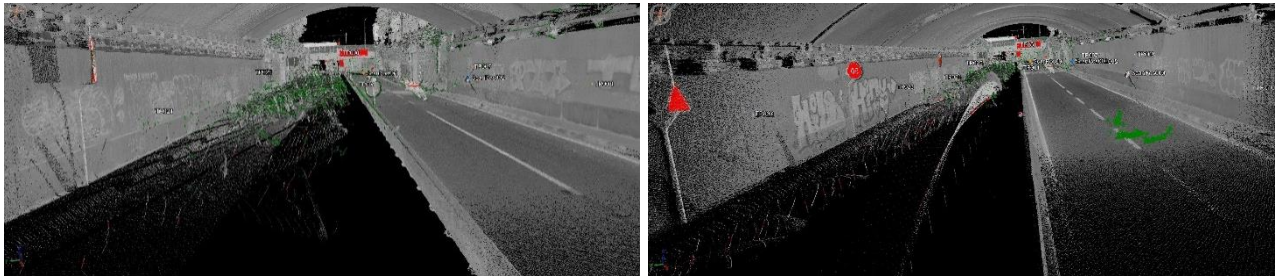


Figura 6-28 Parte dei dati di scansione all'imbocco ovest del sottopasso nella figura a sinistra e al centro del primo tratto del sottopasso in RISCAN PRO®.

Pertanto, grazie al riconoscimento semi-automatico dei marker tra coppie di scansioni precedentemente individuati, tutte le 13 scansioni, ognuna con il proprio sistema di riferimento, sono state riferite ad un sistema di coordinate di progetto corrispondente alla prima posizione di scansione all'interno del tunnel (*ScanPos<sub>002</sub>*) (Figura 6-28).

Il secondo step è il "Multi Station Adjustment 2" (MSA); tale procedura completamente automatizzata ha consentito di ottimizzare la registrazione relativa tra scansioni per forma e georeferenziare tutte le scansioni in un sistema di coordinate assoluto. In particolare, il MSA tiene conto di tutte le misure effettuate e dei target disponibili; l'algoritmo calcola i parametri di traslazione e rotazione per la georeferenziazione dell'intero blocco di scansioni utilizzando le coordinate note dei target misurati assicurando che le posizioni di scansione siano già note con una buona approssimazione iniziale prima di ottimizzare la registrazione globale (Figura 6-29).

Figura 6-29 Ottimizzazione della registrazione delle scansioni con Multi-Station Adjustment (MSA) con i punti controllo e i marker utilizzati in RISCAN PRO®.

Durante la fase di ottimizzazione della registrazione, è possibile decidere di includere le misure di GNSS e assetto derivanti dalla piattaforma inerziale al fine di evitare inclinazioni delle posizioni di scansione indesiderate (Figura 6-30).

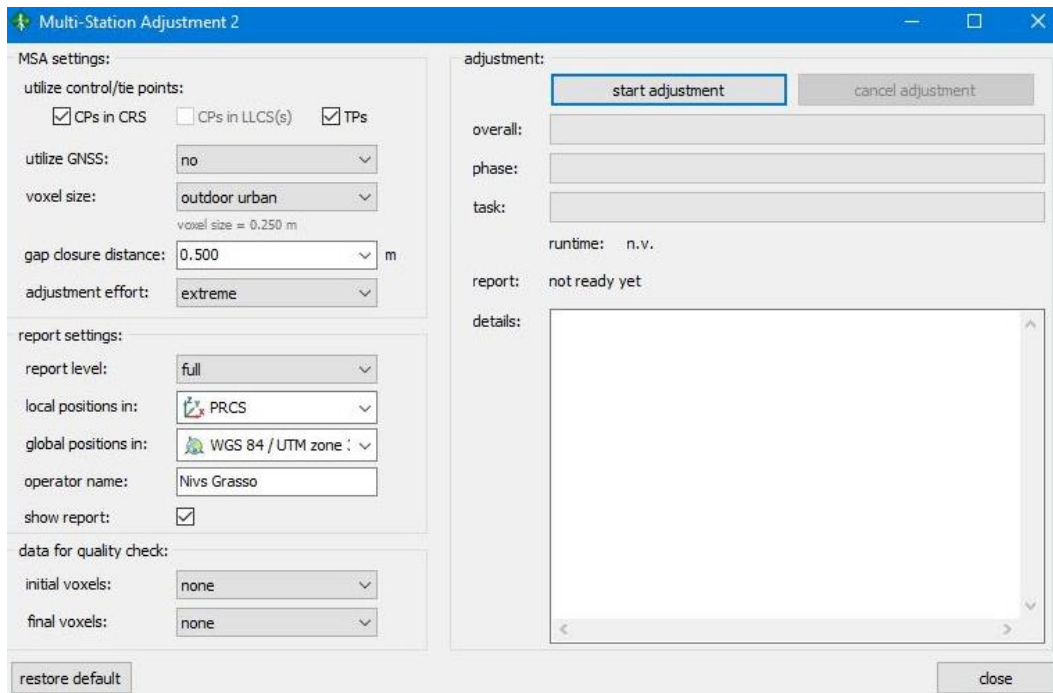


Figura 6-30 Settaggio dei parametri nella MSA2 legati all'ambiente oggetto di studio e avvio della procedura MSA2 in RiSCAN PRO®.

Il software RiSCAN PRO® per ottimizzare la registrazione e avvicinare tra loro le scansioni per forma, utilizza un processo iterativo, nel quale ricerca i piani omologhi tra le diverse scansioni. La prima iterazione ha richiesto più di 12 minuti (Figura 6-31); il tempo impiegato è legato all'accuratezza della prima registrazione "Automatic Registration 2" e il numero di posizioni di scansione [S30].

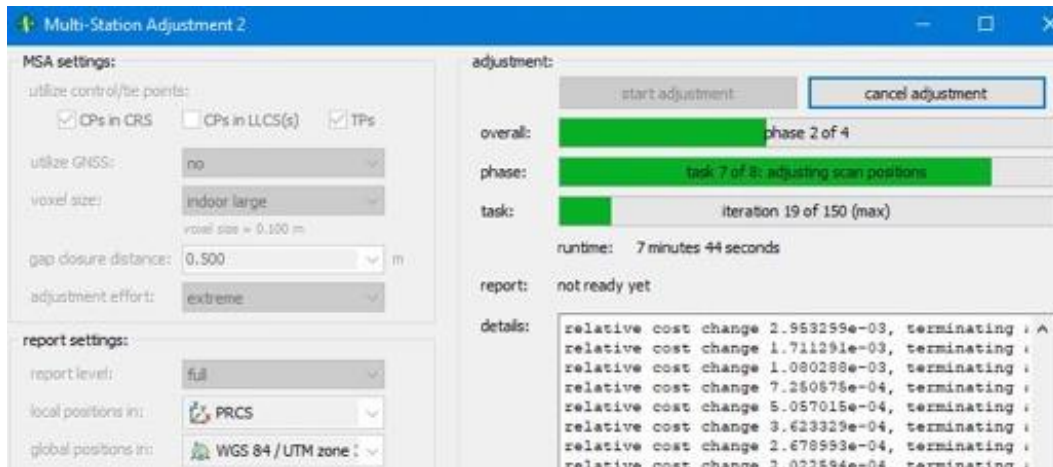


Figura 6-31 Procedura MSA2 iterativa in RiSCAN PRO®.

Durante la fase di MSA il software in genere produce un report con i valori degli scarti stimati tra i vari tie-points identificati nelle scansioni e le loro coordinate note; dato che non è stato prodotto tale report dal software si è proceduto con il recuperare un file in formato .csv di nome *6\_finalAlign.tpl.csv* contenuto all'interno della cartella "MSA" collegata al progetto contenente l'elenco dei target identificati nelle scansioni, le loro coordinate note misurate utilizzando la tecnica topografica e gli scarti. Le coordinate x, y e z fornite per ciascun target sono, infatti, le coordinate dei rispettivi centri calcolate dallo scanner dalla posizione di scansione. La distanza tra i due centri calcolati di ciascun target è detta "residua" e viene calcolata utilizzando la formula della distanza 3D:

$$d_{x,y,z} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

dove  $(x_1, y_1, z_1)$  sono le coordinate del centro del target calcolate da ScanPos001 e  $(x_2, y_2, z_2)$  sono le coordinate del centro del target calcolate da ScanPos002.

Al fine di valutare l'accuratezza della procedura di registrazione delle scansioni il file *6\_finalAlign.tpl.csv* è stato importato in Excel e sono stati calcolati il valore medio, massimo e minimo e RMSE degli scarti stimati; tali valori sono riportati in *Tabella 6-2*:

|              | <b>dX_PRCs [m]</b> | <b>dY_PRCs [m]</b> | <b>dZ_PRCs [m]</b> | <b>Distanza [m]</b> |
|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Valore medio | -0,0007            | -0,0003            | -0,0001            | 0,0167              |
| Valore max   | 0,0245             | 0,0291             | 0,0211             | <b>0,0417</b>       |
| Valore min   | -0,0252            | -0,0252            | -0,0256            | 0,0028              |
| RMSE         | 0,0098             | 0,0115             | 0,0100             | 0,0181              |

*Tabella 6-2* Calcolo dei valori medio, massimo, minimo e scarto quadratico medio dei residui stimati tra i target identificati nelle scansioni.

Tali valori sono di poco superiori alla soglia prestabilita di 0,02 m tranne uno ovvero il valore massimo nella distanza di 0,04 m circa. La distribuzione normale (RMSE) risulta invece centrata intorno a 2 cm. Gli scarti ottenuti durante la prima iterazione risultano pertanto non buoni; i motivi che hanno portato ai seguenti risultati possono essere l'errata collimazione dei target da parte dell'operatore, errata individuazione del centro del target (presi di scorcio) e l'elevata presenza di rumore. È stato quindi necessario non considerare durante la fase di registrazione automatica la collimazione dei marker con lo scarto maggiore.

È stato quindi individuato nel file Excel il tie-point con valore massimo nella colonna della distanza euclidea rispetto alle coordinate note pari a 0,0417 m corrispondente al T0013 della ScanPos009. Una volta che è stato eliminato (ignorato) sono stati ricalcolati i residui. Dato che il valore massimo della distanza risultava superare ancora di poco la soglia prefissata è stato eliminato un secondo target T0001 corrispondente alla ScanPos005. Verificato che tutti i valori fossero inferiori alla soglia prestabilita si è avviata nuovamente la procedura di registrazione MSA2 al fine di minimizzare gli errori di allineamento attraverso il calcolo della migliore geometria di sovrapposizione tra tutte le scansioni. L'allineamento ottimizzato ha quindi permesso di ottenere una deviazione standard inferiore a 2,5 cm.

Una volta terminata questa operazione di registrazione tutte le scansioni sono state georiferite nel sistema UTM-ETRF2000 - WGS84 fuso32N attraverso le coordinate note dei target. Pertanto, a partire dalla registrazione di ciascuna delle 13 scansioni fornite è stata creata un'unica nuvola di punti 3D georeferenziata che bene rappresenta la prima parte del tratto del sottopasso che va da Via Nizza alla rotonda Lingotto (*Figura 6-32*).

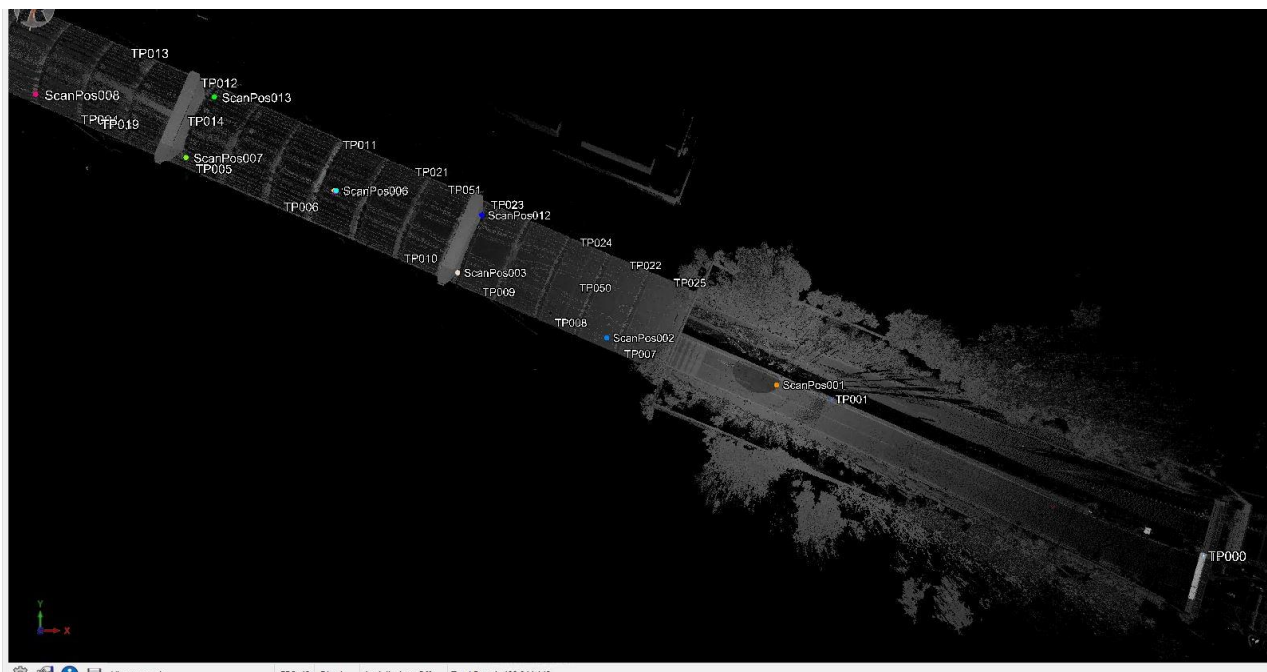


Figura 6-32 Nuvola di punti georeferenziata e distribuzione spaziale dei punti di scansione per il rilievo LiDAR di dettaglio della parte del tunnel di interesse (inizio imbocco ovest metà della prima canna) in RiSCAN PRO®.

Nell'immagine seguente (Figura 6-33) insieme alla nuvola di punti nella scala dei grigi georiferita sono riportati le 13 ScanPosition<sub>i</sub> e tutti i target di coordinate note utilizzati.

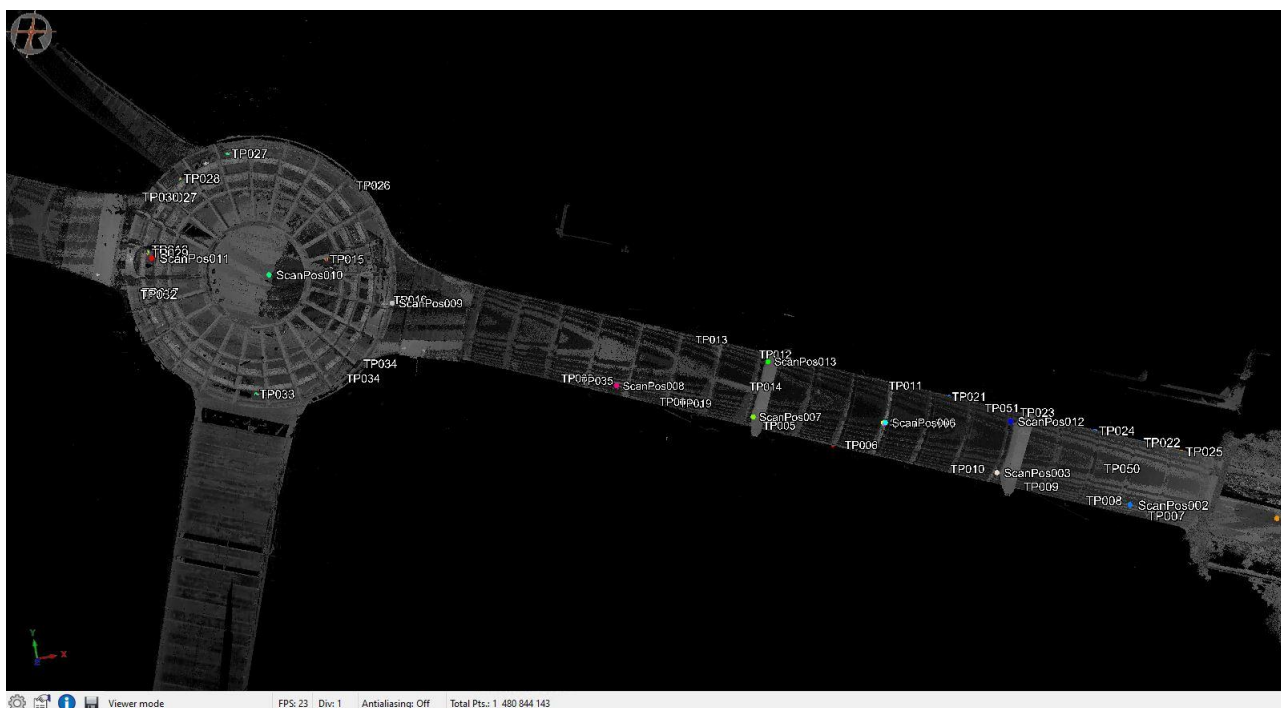


Figura 6-33 Nuvola di punti georeferenziata e distribuzione spaziale dei punti di scansione per il rilievo LiDAR di dettaglio della parte del tunnel di interesse (inizio imbocco ovest fino alla rotonda Lingotto) in RiSCAN PRO®.

## 6.5 Colorazione delle nuvole di punti

### 6.5.1 Calibrazione della fotocamera e colorazione delle nuvole di punti.

Dopo le fasi di allineamento e georeferenziazione si è proceduto alla colorazione delle point clouds delle singole scansioni; in questa fase è stata attribuita l'informazione radiometrica ad ogni punto della nuvola di punti contenente solo le informazioni relative alla riflettività del materiale. L'obiettivo è stato quello di colorare adeguatamente ogni punto della nuvola di punti con i corrispondenti pixel delle immagini RGB assegnate acquisite contestualmente alle scansioni (11 immagini per scansione) [S25]. Le informazioni sulla posizione relativa e l'orientamento della fotocamera rispetto al centro strumentale del laser scanner per ogni immagine acquisita sono necessarie per applicare correttamente il colore di un pixel su una "point cloud" 3D.

In RiSCAN PRO® è stato definito il modello di fotocamera, inseriti i parametri di calibrazione della fotocamera (interni ed esterni) e dell'obiettivo utilizzati [S27]. Il laser scanner impiegato supporta diversi modelli di fotocamera. Anche le lenti sono intercambiabili per adattare a diverse applicazioni [S25]. Per utilizzare i dati delle singole immagini devono essere disponibili i dati di calibrazione che contengono i parametri interni della fotocamera. I dati di calibrazione sono contenuti nella sezione delle calibrazioni del file di progetto. RiSCAN PRO®, dal punto di vista teorico, fornisce le informazioni di orientamento e posizione "automaticamente" nel caso in cui la telecamera sia montata sulla parte superiore dello scanner; infatti, con questa configurazione, i parametri descrivono una fotocamera ideale "pin-hole". RiSCAN PRO utilizza un modello a 10 parametri per la calibrazione interna della telecamera (Intel 2003). Nella realtà sia l'obiettivo che il sensore digitale sono affetti da distorsioni significative modellate all'interno di RiSCAN PRO® tenendo conto di sei parametri di distorsione (tangenziale e radiale). Tali parametri includono le informazioni intrinseche della telecamera stessa come la lunghezza focale della lente ( $f_x$  e  $f_y$ ), il punto principale dell'immagine, la dimensione di un singolo pixel del sensore ( $d_x$  e  $d_y$ ) e le distorsioni dell'obiettivo e del sensore. La distorsione dell'obiettivo è modellata da almeno due coefficienti radiali e due coefficienti tangenziali, rispettivamente  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ . [19]. Pertanto, i parametri di orientamento interno e le distorsioni, dato che dipendono dal tipo di fotocamera e dall'obiettivo utilizzati, risultavano già noti ed è stato sufficiente importare il certificato di calibrazione all'interno del software.

Inoltre, per utilizzare le informazioni dell'immagini acquisite anche l'orientamento esterno della fotocamera deve essere conosciuto. La definizione dell'orientamento esterno differisce per i due diversi tipi di immagini gestite in RiSCAN PRO [S27]:

- immagini di tipo 1: immagini scattate quando la fotocamera è montata sopra lo scanner;
- immagini di tipo 2: tutte le altre immagini, cioè quando la fotocamera non è montata sullo scanner.

I parametri di calibrazione esterni quando la camera è montata sulla parte superiore dello scanner dipendono dalle posizioni relative tra il laser e la telecamera [S25]. Quest'ultimi, essendo relativi al dispositivo di montaggio e, quindi, alla geometria e all'orientamento del supporto della telecamera utilizzato, vengono modificati dopo la rimozione e il rimontaggio della fotocamera. Ciò avviene ogni volta che lo scanner e la fotocamera devono essere separati per essere riposti nelle loro singole custodie o se la fotocamera esce dalla calibrazione, come nel caso in cui la fotocamera viene bussata o rimossa per manutenzione [S25].

Per tenere conto di queste modifiche è necessario procedere alla stima dei parametri di orientamento esterno dopo ogni sessione di rilievo, in quanto gli angoli con cui la fotocamera sarà montata differiscono leggermente dagli angoli in cui è stato montato il dispositivo precedentemente.

Al fine di colorare le 13 scansioni acquisite occorre mettere in relazione il campo visivo della telecamera con quello del laser [S25]; occorre quindi che entrambi i sistemi di coordinate, SOCS e CMCS, siano coincidenti. Il SOCS è diverso dal CMCS della fotocamera. Inoltre, la direzione dei vettori di quest'ultima segue la legge della mano destra, con l'asse x verso l'alto, l'asse y da sinistra verso destra e l'asse z è lo stesso del centro del campo visivo della fotocamera (Figura 6-34).

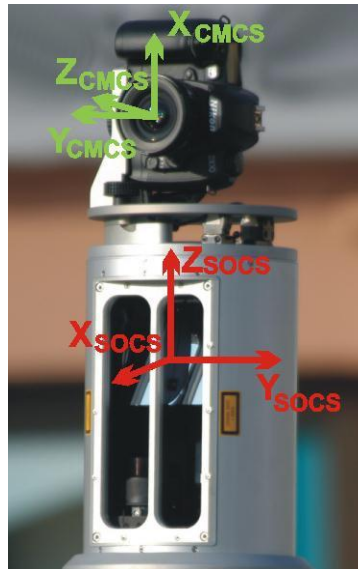


Figura 6-34 Laser scanner RIEGL LMS-Z360 dotato telecamera digitale montata sopra e rappresentazione dei diversi sistemi di coordinate rispettivamente del laser scanner "Scanner's Own Coordinate System" (SOCS) e della telecamera "Camera Coordinate System" (CMCS) [S25].

Per fare sì che coincidano i due sistemi è necessario applicare una matrice composta rispettivamente da 9 parametri legati alla rotazione e 3 parametri relativi alla traslazione. Questa procedura consente di trovare una matrice di rotazione e traslazione tra i pixel acquisiti dalla camera e le nuvole di punti acquisite dallo scanner.

Poiché la telecamera è saldamente montata sopra lo scanner e l'orientamento della piattaforma è ben noto, l'orientamento della telecamera all'interno del sistema di coordinate dello scanner è ben definito con l'esecuzione di una procedura di calibrazione dopo il montaggio della telecamera. Non appena la posizione di scansione è registrata nel sistema di coordinate del progetto, le informazioni dell'immagine possono essere completamente utilizzate. Le informazioni sulla calibrazione del montaggio specificano i 6 gradi di libertà del sistema di coordinate della telecamera rispetto al sistema di coordinate dello scanner, vale a dire 3 parametri di rotazione e 3 parametri di traslazione.

All'interno di RiSCAN PRO la calibrazione del montaggio è memorizzata come una matrice 4 x 4 per comodità di definizione e applicazione. La matrice di calibrazione di montaggio "mounting calibration matrix" (Figura 6-35) consente il passaggio dal sistema di coordinate dello scanner al sistema della telecamera nel caso in cui la parte di rotazione dello scanner si trovi nella posizione di  $\varphi$  uguale a  $0^\circ$ . La rotazione aggiuntiva è modellata dalla matrice COP "camera's orientation and position matrix" memorizzata con ogni immagine di tipo 1.

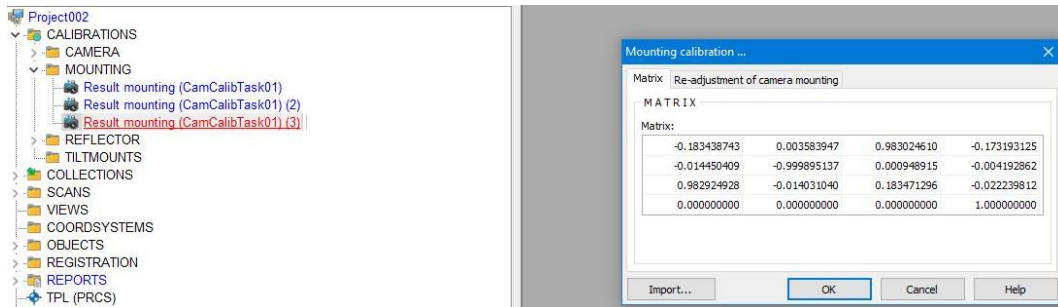


Figura 6-35 Matrice 4x4 "Mounting calibration matrix".

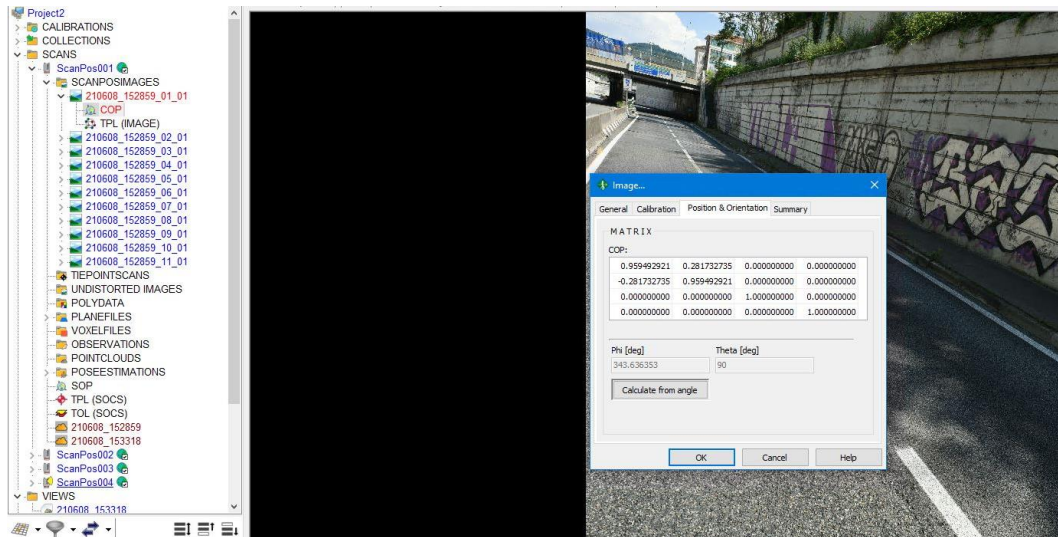


Figura 6-36 ScanPos1 "SCANPOSIMAGES" matrice COP "Camera Orientation and Position Matrix"

I parametri di orientamento esterno della camera, invece, devono essere ricalcolati ogni volta che viene smontata e rimontata insieme all'offset tra il centro strumentale del laser e il centro della camera. Al fine di stimare i sei parametri di calibrazione esterna (tre traslazioni e tre rotazioni), è necessario poter identificare in almeno una delle immagini acquisite alcuni punti di coordinate note. Le immagini di tipo 1 in RiSCAN PRO vengono memorizzate nella cartella corrispondente alla posizione di scansione in cui sono state scattate le immagini. Nel caso studio sono stati sfruttati gli stessi target di coordinate note utilizzati per la georeferenziazione delle scansioni. Sono stati identificati i marker comuni nelle scansioni e nelle immagini.



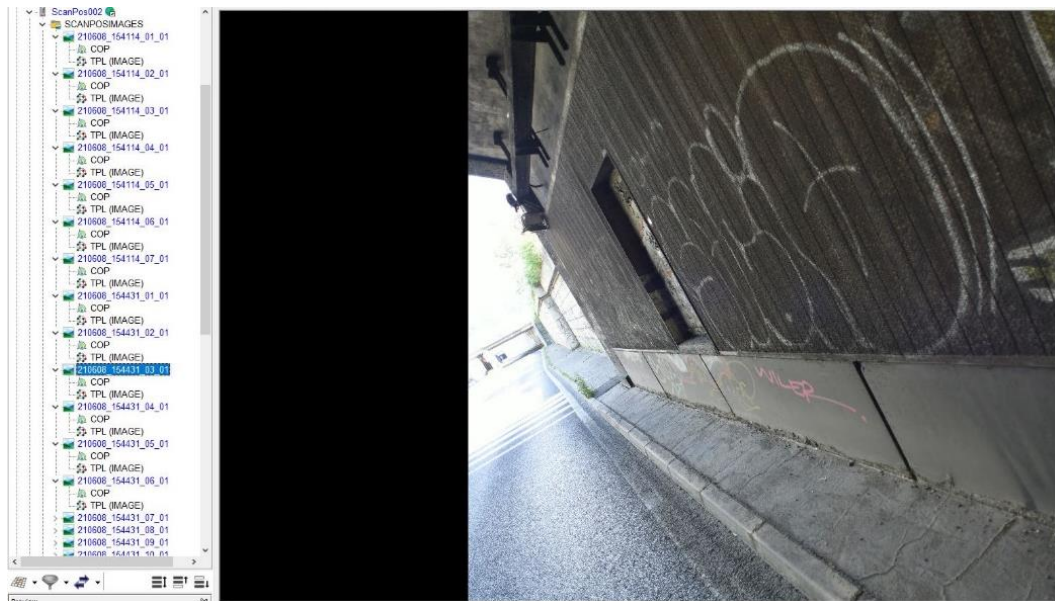


Figura 6-37 Individuazione di un tie-point (T0007) in un'immagine all'interno della scartella "SCANPOSIMAGES" relativa alla ScanPos002.

Infine, sono stati creati i vari collegamenti a coppie tra i punti immagine (centri dei target circolari) e le coordinate tridimensionali. Al fine di poter stimare i 6 parametri è necessario individuare almeno tre punti di coordinate note nella stessa immagine. Dato che in alcune immagini non c'erano un numero minimo di tre tie-points sono stati individuati altri punti sia sulle immagini che nelle scansioni.

Infine, è stata avviata la procedura di "Re-adjustment of camera Mounting" lasciando invariate le impostazioni di default ovvero utilizzando nella modalità di calcolo come variabile solo la rotazione. In questo modo il software ottimizza solo i tre parametri di rotazione dei sei parametri che definiscono la calibrazione del montaggio tramite un algoritmo che si basa sulla minimizzazione della somma dei quadrati dei residui (Figura 6-38).

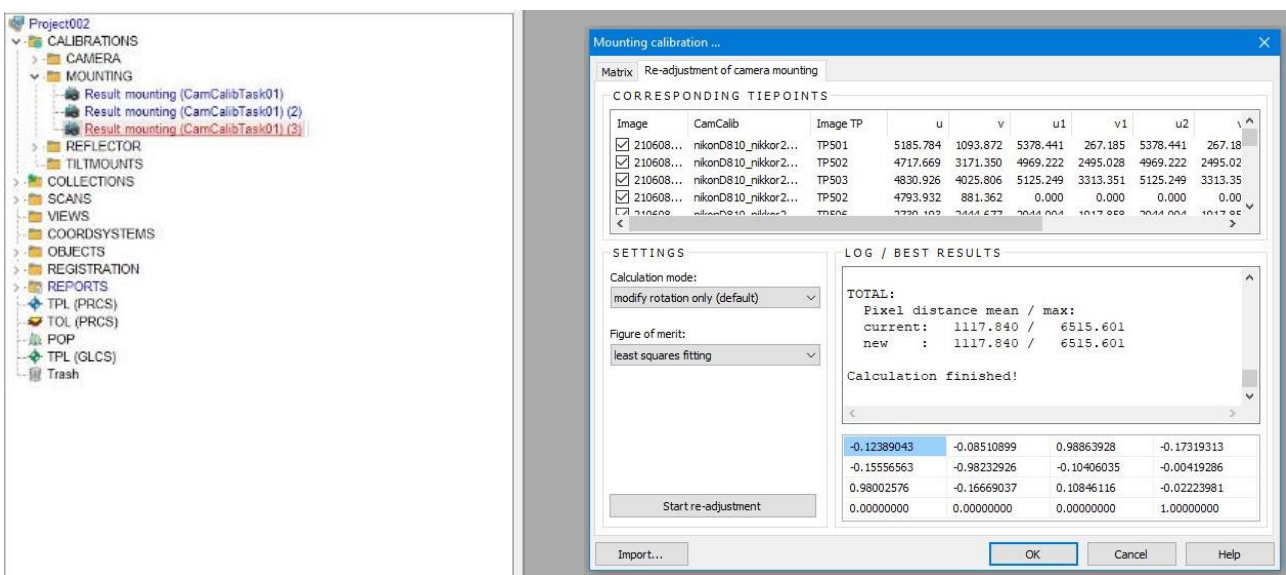


Figura 6-38 Mounting calibration.

Lo svantaggio di questo algoritmo è che il risultato può essere modificato in modo significativo anche da un singolo valore anomalo derivante da un collegamento errato. Pertanto, è stato necessario controllare attentamente i vari link creati [S25] e tramite una procedura iterativa trovare

la soluzione migliore. In questo modo è stato possibile stabilire la migliore corrispondenza tra le coppie di tie-points e calcolare l'orientamento esterno della camera.

Una volta trovata la corretta calibrazione viene assegnata a tutte le immagini del progetto. Una volta noti i parametri di orientamento interno ed esterno, il software è in grado di sfruttare tutte le immagini a disposizione per la colorazione della nuvola di punti. I colori dei pixel acquisiti dalla fotocamera vengono estratti dall'immagine e fusi nella nuvola di punti, in modo che ad ogni punto della nuvola venga attribuito il colore corretto dall'immagine digitale [Abdelhafiz et al., 2005] [S25]. Di seguito in *Figura 6-39* viene mostrato il risultato ottenuto grazie al software RiSCAN PRO.



*Figura 6-39* Nuvola di punti georeferenziata e colorata all'imbocco ovest del sottopasso Lingotto.

La combinazione di scanner, software e fotocamera si traduce in dati 3D fotorealistici, utili per l'identificazione esatta degli elementi, con i loro dettagli e posizioni, consentendo misure della distanza, nonché una ricreazione di qualsiasi punto di vista virtuale.

Le nuvole di punti georeferenziate e colorate relative ad ogni scansione, sono state unite in un'unica nuvola di punti ed esportata in formato .las impostando diversi parametri tra cui la risoluzione delle coordinate X, Y e Z pari a 0,01 m, il sistema di riferimento (GLCS) e l'unità di misura (m). Tuttavia date le elevate dimensioni della nuvola (più di 53 milioni di punti) sono state esportate le singole nuvole di punti riferite a ciascuna scansione con un primo campionamento a 1 cm in formato .las; tale formato consente di conservare l'informazione radiometrica associata ad ogni punto ed è inoltre supportato da molteplici software di gestione, analisi e post-processamento di dati 3D.

Una volta esportate le singole nuvole di punti si è proceduto con il filtraggio e la conseguente rimozione di tutti quei punti non utili al fine di modellazione BIM del sottopasso, come spiegato nel dettaglio di seguito.

## 6.6 Filtratura e ricampionamento tramite Cloud Compare

Gli steps del processo di trattamento dei dati LiDAR in Cloud Compare sono riportati nel seguente flowchart:



### 6.6.1 Importazione in CloudCompare delle singole nuvole di punti

Il primo step consiste nell'importazione delle singole nuvole di punti in CloudCompare esportate da RiSCAN PRO in formato .las tramite trascinamento nell'area di lavoro. Essendo entità con coordinate molto grandi sono state ridotte. Il software suggerisce di spostare (o ridimensionare) l'entità per lavorare in un sistema di coordinate locale con coordinate più piccole (Figura 6-40).

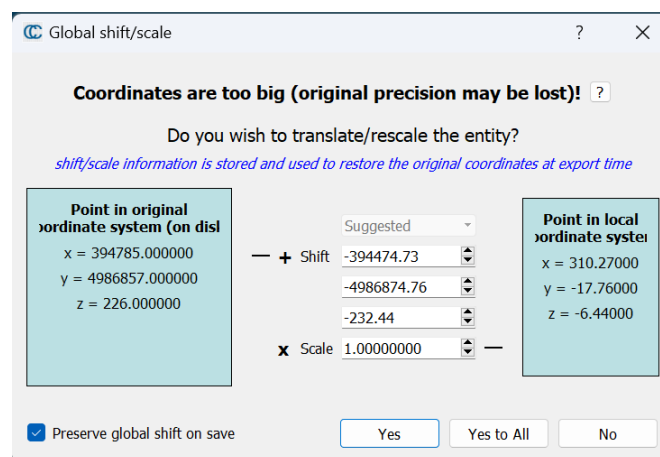


Figura 6-40 Riduzione delle coordinate durante la fase di importazione della nuvola di punti in Cloud Compare.

### 6.6.2 Filtratura e pulitura delle nuvole di punti

Il secondo step consiste nella filtratura e pulitura delle nuvole di punti. La filtratura è stata eseguita con software CloudCompare impostando una distanza minima tra punti di 1,5 cm tramite la modalità "spatial".

Inizialmente, tutti i punti associati ai veicoli in transito o alle aree dell'ambiente circostante che non erano significative per la rappresentazione del Sottopassaggio del Lingotto sono stati eliminati manualmente. La pulitura di queste nuvole ha comportato un notevole dispendio di tempo in quanto, su Cloud Compare sono state caricate le singole esportazioni in formato .las ottenute con RiSCAN PRO. Difatti provando a caricarle più di una per volta si andava incontro ad un rallentamento del programma tale da non consentire la pulitura. Per velocizzare la procedura di pulitura volta ad eliminare il rumore dovuto al passaggio dei veicoli nella semicarreggiata opposta durante il rilievo e gli oggetti non necessari ai fini della modellazione si è scelto, inoltre, di sezionare le singole nuvole di punti.

Durante la fase di pulitura sono stati selezionati ed eliminati tutti i punti legati al passaggio dei veicoli nella carreggiata opposta durante le fasi di rilievo e agli operatori. Quello che si è scelto di tenere è l'insieme degli elementi infrastrutturali, impiantistici e di arredo del tunnel.

### 6.6.3 Unione

Una volta terminata la fase di filtraggio e di pulizia si è proceduto con l'unione automatica di tutte le scansioni in un'unica nuvola di punti.

### 6.6.4 Sottocampionamento della nuvola di punti 3D

Anche dopo le operazioni di filtratura, l'elevata densità di punti acquisiti rendeva la gestione della nuvola difficile, anche per computer performanti. Di conseguenza, si è deciso di utilizzare lo strumento di sottocampionamento di CloudCompare impostando una distanza di 1,5 cm tra due punti, per una migliore gestione successiva della point cloud in fase di modellazione. Difatti, si è ritenuto che la densità di informazioni fosse sufficiente per la creazione di un modello BIM dell'infrastruttura in oggetto.

Il risultato finale digitale di questo processo di "editing" è una nuvola georeferenziata costituita da oltre 40 milioni di punti del Sottopassaggio del Lingotto con informazioni radiometriche e di riflettività collegate. Essendo georeferenziata è possibile ottenere le coordinate 3D reali di ciascun punto nel sistema di coordinate UTM - ETRF2000 - WGS84 fuso 32N, oltre che effettuare delle misurazioni.

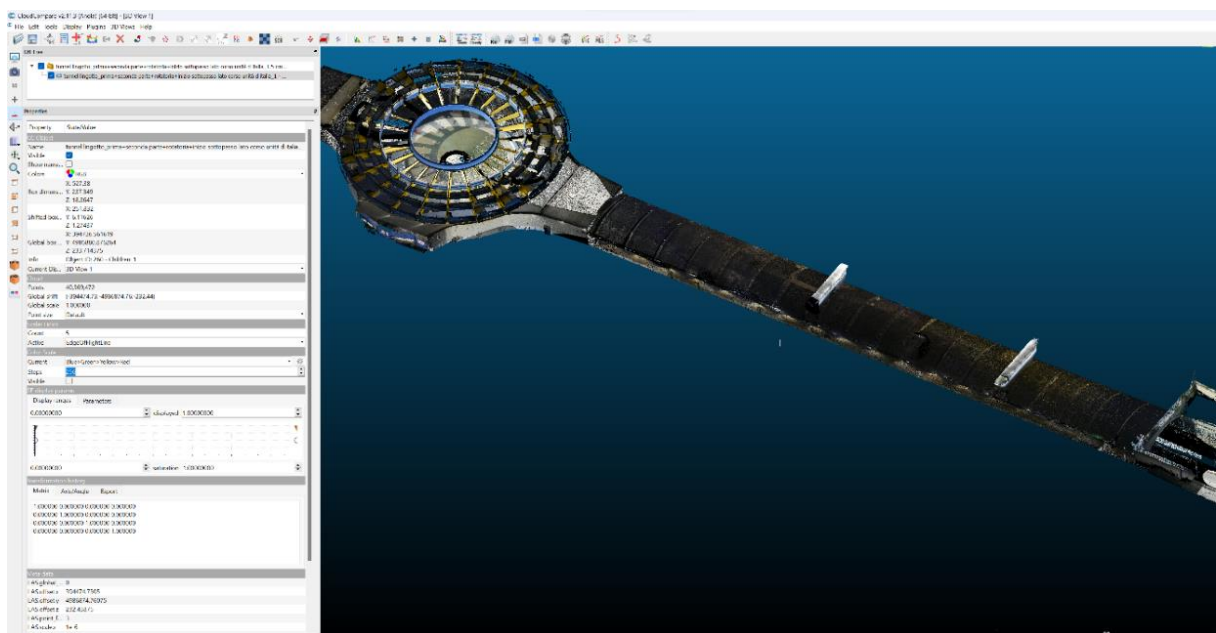


Figura 6-41 Nuvola di punti in CloudCompare georeferenziata, filtrata e pulita.

### 6.6.5 Definizione di un sistema di coordinate locale e dell'asse longitudinale del tunnel

Al fine di creare un modello tridimensionale partendo dalla nuvola di punti è stato creato un sistema di riferimento locale in Autocad (Figura 6-42) ed importato in formato .dxf in CloudCompare con origine in corrispondenza del punto in basso a sinistra dell'imbocco lato est della prima parte del tunnel venendo da Corso unità d'Italia. Le coordinate del punto scelto come origine nella nuvola di punti in CloudCompare sono (Tabella 6-3):

|                             |                |
|-----------------------------|----------------|
| X [m] - (E)                 | 394745,419805  |
| Y [m] - (N)                 | 4986859,132781 |
| Z [m] - (Quota ortometrica) | 226,41         |

Tabella 6-3 Coordinate cartografiche del punto scelto come origine del sistema locale.

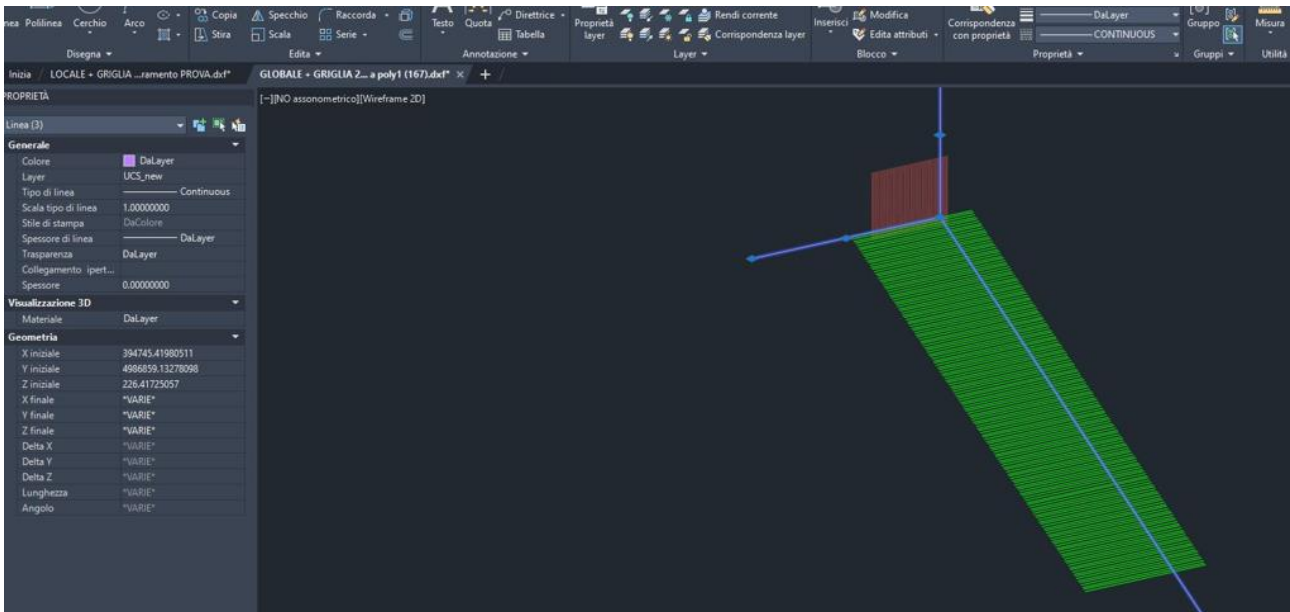


Figura 6-42 Definizione del sistema di coordinate locale nel punto in basso a sinistra dell'imbocco ovest del sottopasso in Autocad e i piani di sezione trasversali utilizzati per ottenere le sezioni trasversali "Extracted Sections" in Cloud Compare (in verde).

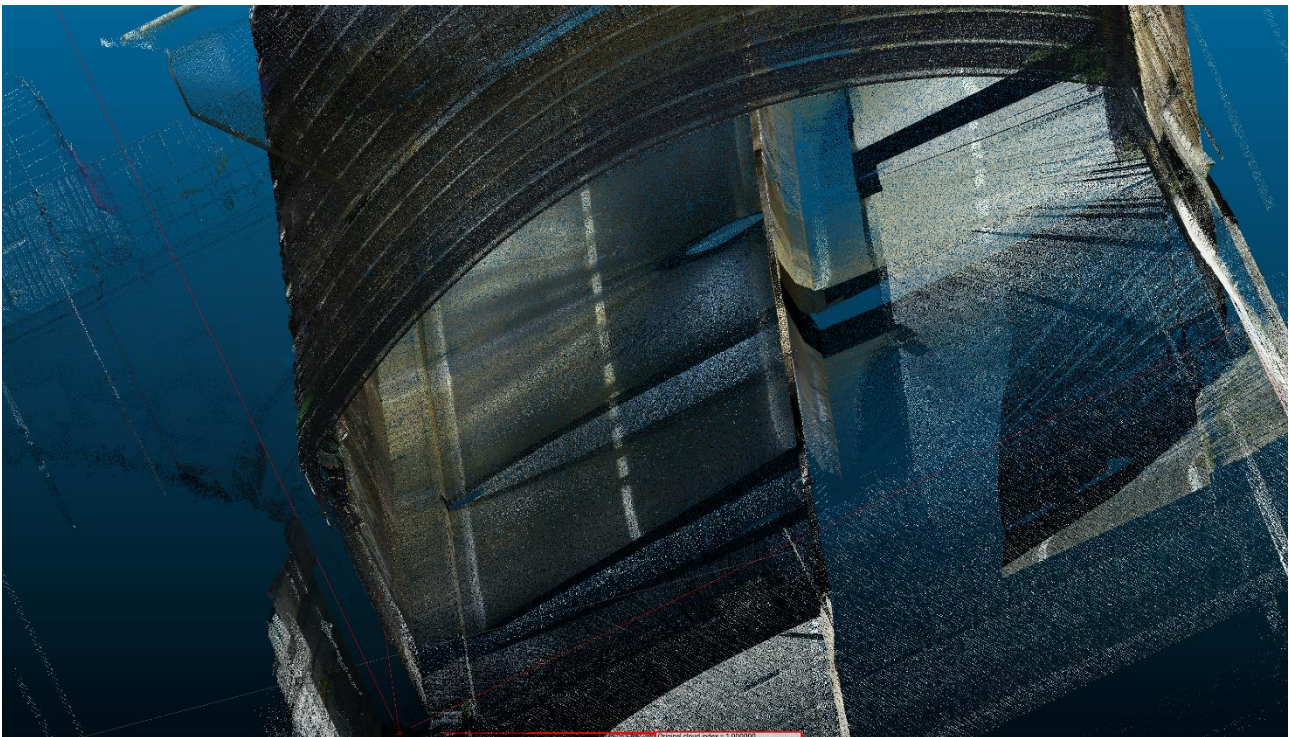


Figura 6-43 Sistema di coordinate globale importato in CloudCompare.

Inoltre, per estrarre le sezioni trasversali del tunnel, è stata creata una polilinea sulla nuvola di punti all'interno di CloudCompare come asse longitudinale di lunghezza pari a circa 163,5 m del tratto scelto.

#### 6.6.6 Estrazione delle sezioni significative in Cloud Compare ed esportazione della nuvola di punti

Al fine di generare un modello InfraBIM della parte strutturale del tratto selezionato di tunnel è stato necessario estrarre alcune sezioni significative. In particolare, partendo dalla nuvola di punti sono state generate le tracce dei piani di sezione ortogonali all'asse longitudinale creato. Sono state quindi estratte le sezioni trasversali dell'oggetto che contengono sia "slices" di nuvole di punti di spessore 0,2 cm sia come polilinee 3D di involucro in formato .dxf quindi compatibile con i software di gestione e modellazione dei dati CAD.

Ogni sezione è stata poi salvata in una cartella con l'asse longitudinale e con il sistema di riferimento globale OXYZ creati in Autocad. Nei programmi CAD per definire la posizione di un punto nello spazio tridimensionale viene utilizzato un sistema di coordinate cartesiane detto WCS (World Coordinates System); ciò è stato necessario per avere un riferimento in ciascuna sezione durante la fase di modellazione in ambiente BIM.

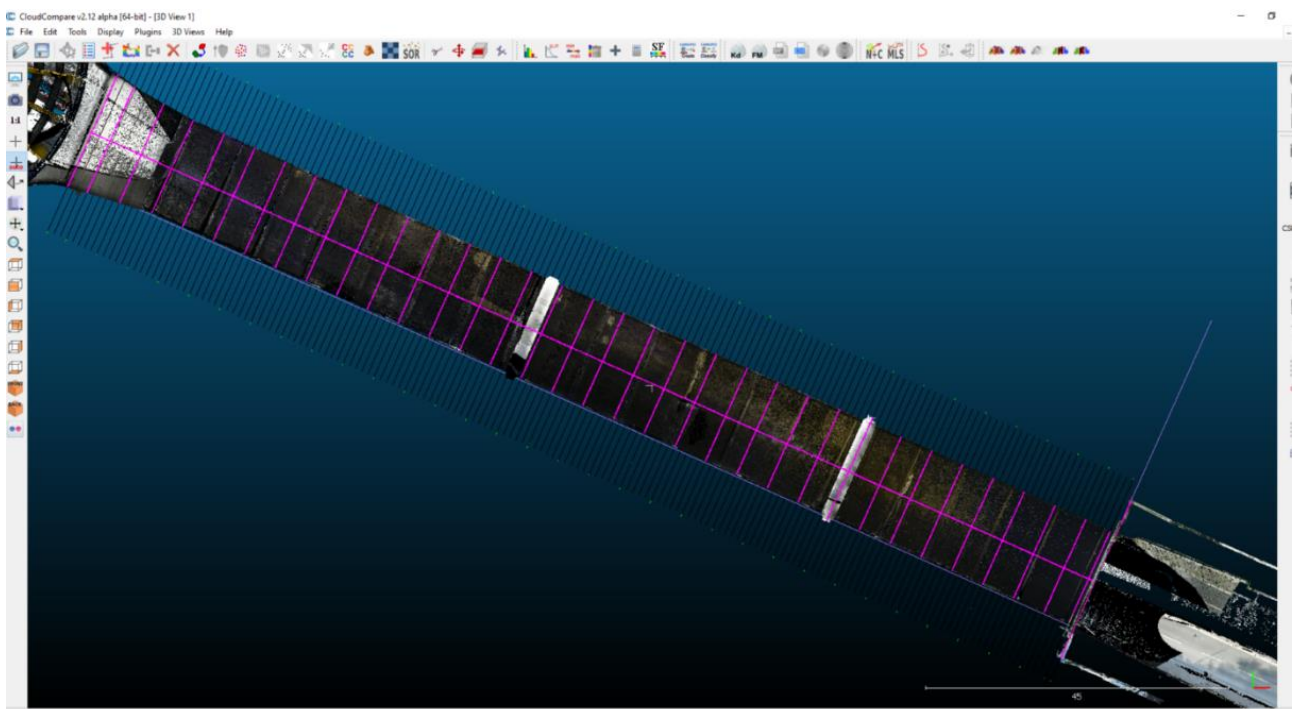


Figura 6-44 Sezioni Polilinee e "Slice" della point cloud delle sezioni scelte per costruire il modello BIM.

Tuttavia, per definire la geometria del modello strutturale del tunnel si è scelto di considerare sezioni con un passo di 5 m come mostrato in Figura 6-45; in particolare, sono state considerate 34 sezioni trasversali del tratto in esame. Data la particolare geometria del tunnel all'imbocco la sezione iniziale è stata modellata a parte; in modo analogo è stato fatto per la sezione terminale.

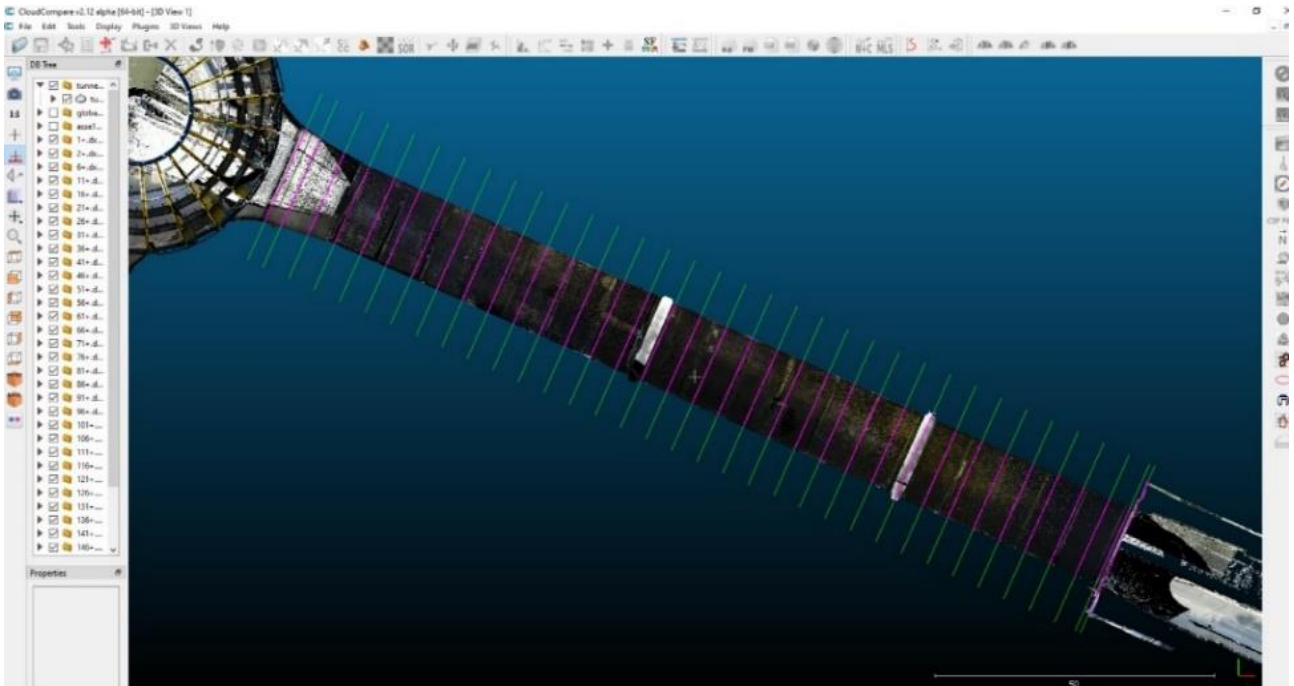


Figura 6-45 Sezioni trasversali scelte per costruire il modello BIM: in verde le tracce di sezione e in rosa le "slice clouds"

Infine, la nuvola di punti è stata esportata da Cloud Compare in due formati: .las e .E57; il primo è stato utilizzato nella fase di posizionamento degli elementi del tunnel mentre il secondo per la visualizzazione e l'ispezione del modello in VR come descritto nel capitolo 8.

## 7. Preelaborazione dati per modello BIM in Autodesk ReCap Pro e Revit

### 7.1 Importazione in Recap Pro

Una volta ottenuta la nuvola di punti è stata importata all'interno del software Autodesk ReCap Pro. Si tratta di un software per la conversione, l'editing e la visualizzazione delle scansioni. Tuttavia, il vantaggio principale di Autodesk ReCap Pro è che consente di aprire molti formati di scansione creando, attraverso un processo di indicizzazione, file con formati collegabili su Revit (.rcs e .rcp). L'operazione di indicizzazione permette di riconoscere ogni punto della point cloud come uno snap all'interno dell'ambiente di lavoro. Gli snap consentono di far interagire i punti della nuvola con i vari elementi modellati. Queste proprietà della nuvola rendono più facile la modellazione in quanto elemento capace di fornire informazioni spaziali.

Autodesk ReCap Pro è in grado di importare nuvole di punti ottenute sia con tecniche di fotogrammetria che con laser scanner, conservando la loro georeferenziazione [20]. Grazie a ReCap PRO il file contenente la nuvola di punti esportato da CloudCompare (formato .LAS) è stato convertito in un formato compatibile con il software di modellazione scelto, Revit di Autodesk (formato .rcp) in modo tale da poter importare in Revit la nuvola di punti.

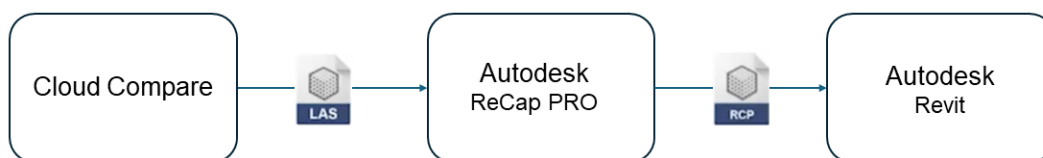


Figura 7-1 Workflow per importare la nuvola di punti all'interno del software di modellazione Revit

Autodesk ReCap Pro durante la fase di conversione dà la possibilità di scegliere i sistemi di coordinate in input e output. Sono state inserite UTM84-32N sia come corrente che destinazione (Figura 7-2).

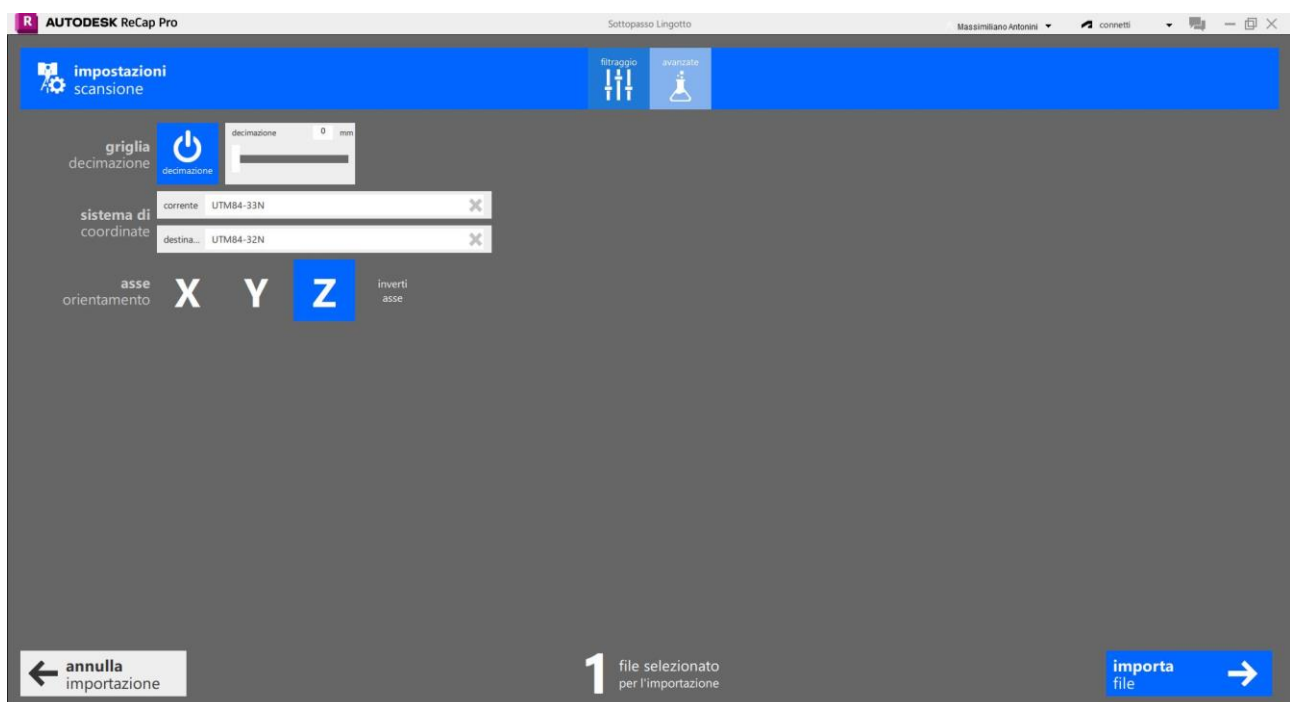


Figura 7-2 Settaggio dei parametri di decimazione e dei sistemi di coordinate in input e in output (UTM84\_32N).



Su ReCap Pro, le azioni di modifica e filtraggio sono limitate rispetto ad altri software di elaborazione di nuvole di punti 3D [20]. Si è scelto di lasciare inalterati i parametri di filtraggio (Figura 7-3).

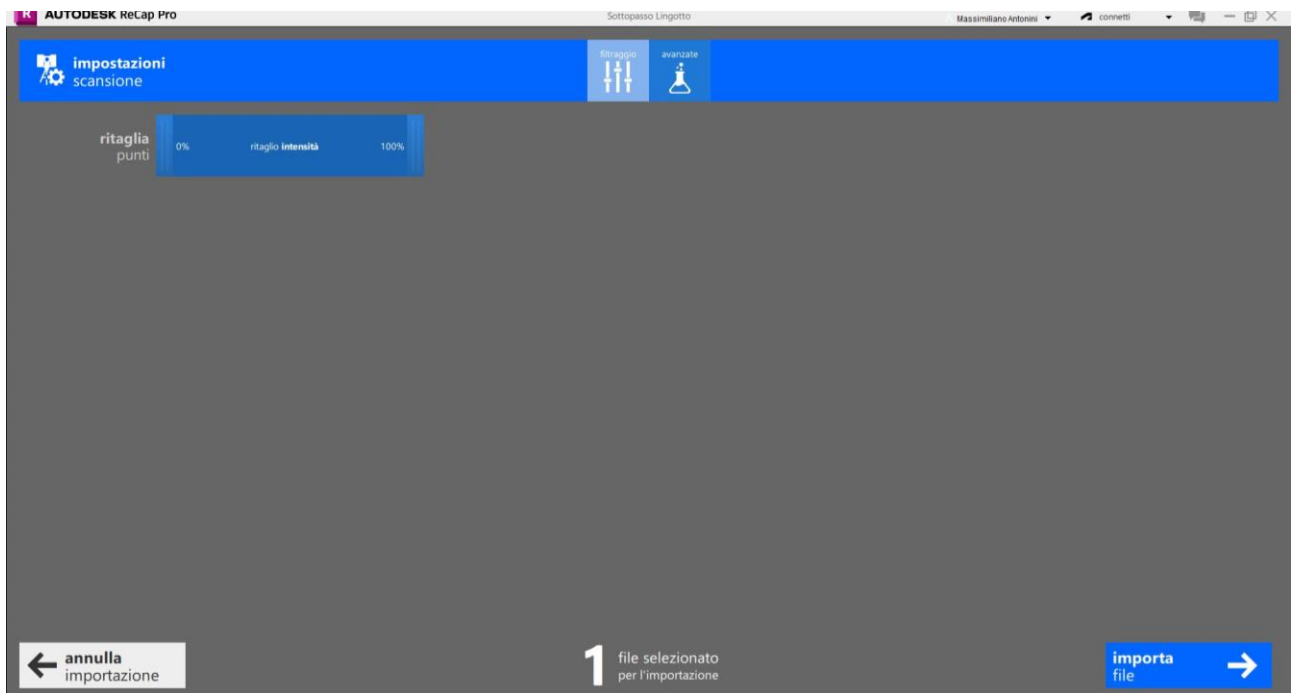


Figura 7-3 Impostazione dei parametri di filtratura in ReCap Pro.

Nella Figura 7-4 viene mostrata la nuvola di punti in ReCap Pro con vista dall'alto lato imbocco est, mentre nella Figura 7-5 e Figura 7-6 l'interno del tunnel.



Figura 7-4 Visualizzazione della nuvola di punti in ReCap Pro: vista dall'alto del sottopasso del tratto scelto come caso studio dall'imbocco lato est alla rotonda Lingotto.

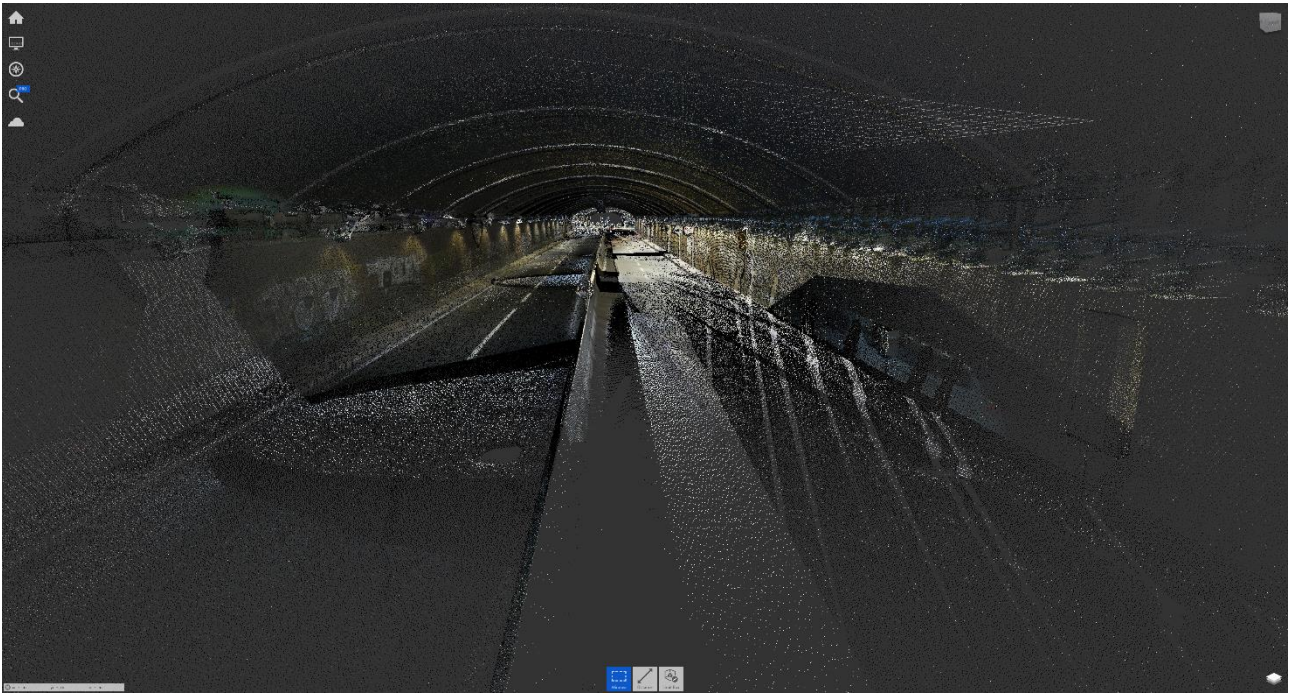


Figura 7-5 Visualizzazione della nuvola di punti in ReCap Pro: vista all'interno del tunnel dall'imbocco est (lato Corso Unità D'Italia).

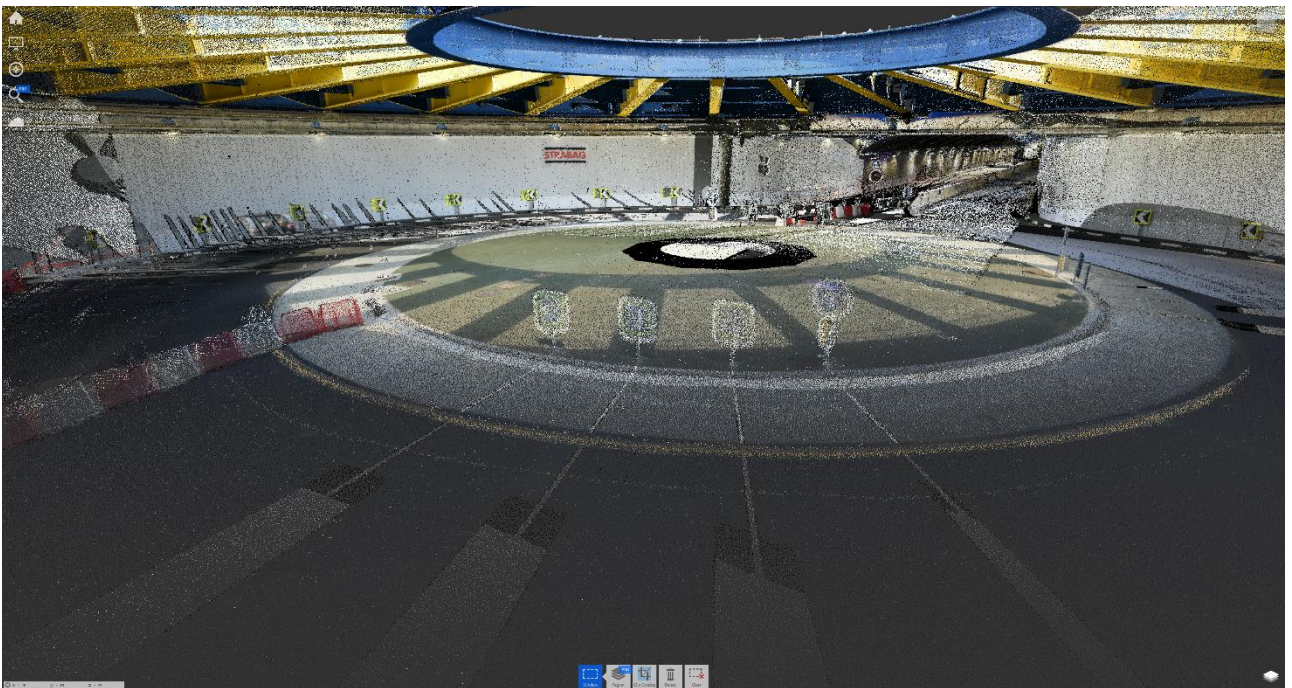


Figura 7-6 Visualizzazione della nuvola di punti in ReCap Pro: vista all'interno del tunnel dalla rotonda all'imbocco est.

## 7.2 Importazione in Revit

Una volta esportata in formato .rcp la nuvola di punti è stata inserita all'interno del software di modellazione scelto (Autodesk Revit 2022) tramite il comando *Inserisci* → *Nuvola di Punti* e impostando il posizionamento in *"Automatico: a coordinate condivise"* (Figura 7-7).

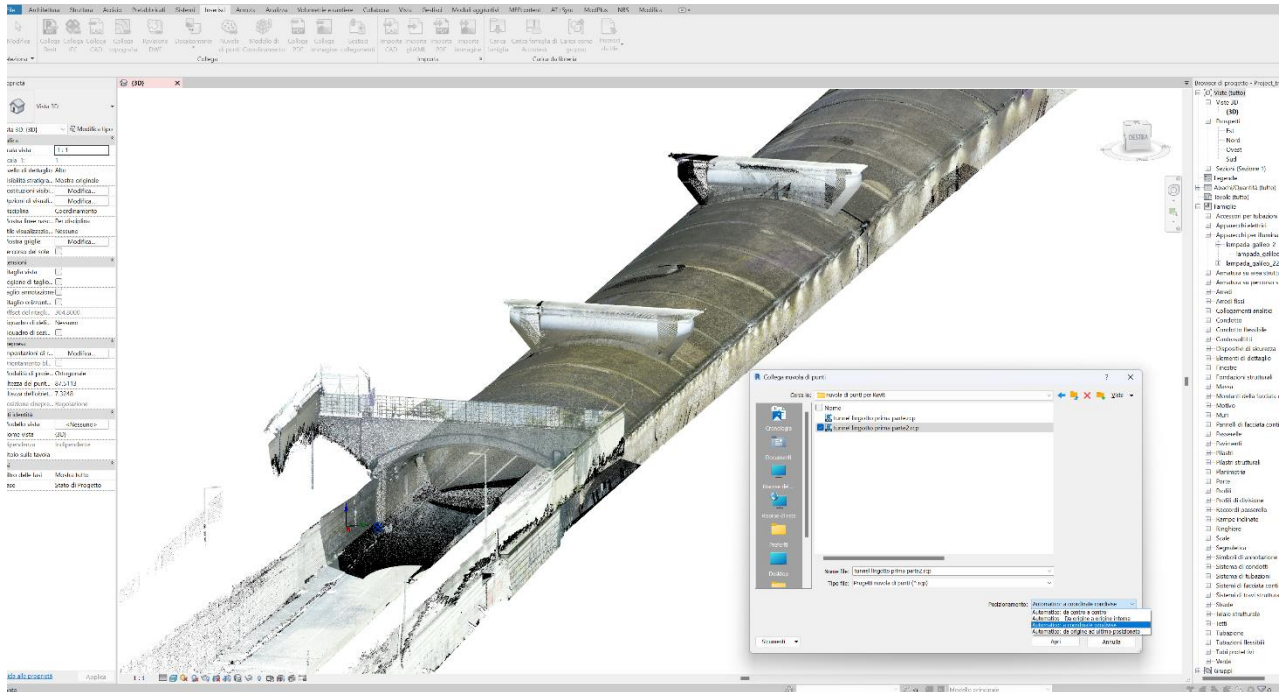


Figura 7-7 Posizionamento automatico a coordinate condivise della nuvola di punti durante la fase di importazione in Revit.

All'interno di un file di Autodesk Revit tre sono i sistemi di coordinate:

- un primo sistema di coordinate relativo al progetto identificato dal simbolo circolare con croce in *Figura 7-8* detto *Punto base di progetto*; tale sistema ha lo scopo di fornire un punto di riferimento da cui ottenere valori di distanze e altezze convenienti, semplici e razionali per la redazione del progetto. Tale punto è personalizzabile liberamente dall'utente per qualsiasi file per ciascuna disciplina;
- un secondo sistema di riferimento la cui origine detta *Punto di Rilevamento o Coordinate condivise* è contrassegnata dall'icona triangolare mostrata nella *Figura 7-8*; si tratta di un sistema di coordinate condivise utilizzato da tutti gli attori partecipanti al processo di progettazione per il coordinamento e il corretto posizionamento di file appartenenti alle diverse discipline. Si tratta pertanto di un'origine comune che garantisce l'allineamento tra i diversi progetti relativi a diverse discipline. Questo sistema di coordinate può essere infatti condiviso non solo con altri file di progetto di Autodesk Revit ma anche da altri programmi relativi alle diverse discipline, per esempio, Autocad e Civil 3D. Si tratta in genere di una posizione nota nel mondo dell'ingegneria civile ovvero un picchetto/caposaldo utilizzato per individuare una stazione del rilievo topografico.
- infine, un terzo sistema la cui origine è un punto detto *Origine del progetto*. Si tratta di un punto non visibile graficamente ma che consente ad Autodesk Revit di referenziare nello spazio gli altri due sistemi di coordinate secondari definiti dall'utente e tutti gli oggetti inseriti nell'area di disegno. È un punto di riferimento ad uso esclusivo del programma ma che rappresenta un anello di collegamento con i software CAD ed è possibile considerare come l'equivalente dell'origine del sistema WCS (World Coordinate System) di Autocad.

All'apertura di un nuovo progetto i tre sistemi di coordinate risultano coincidenti.

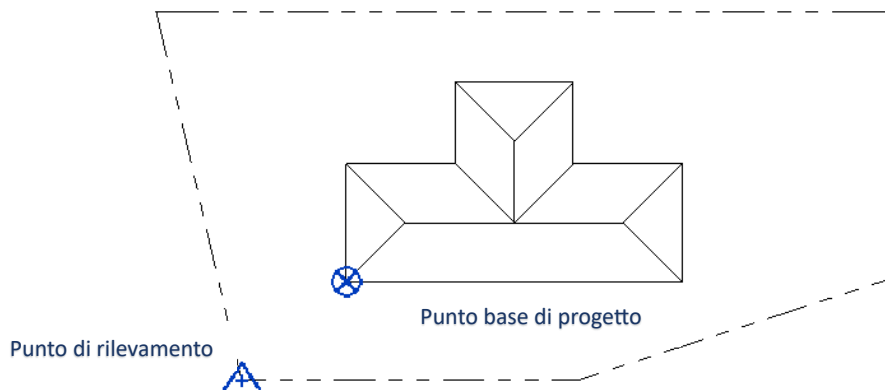


Figura 7-8 Differenza tra Punto di rilevamento (icona triangolare) in corrispondenza di un caposaldo e Punto base di progetto (icona circolare) in corrispondenza di uno spigolo del manufatto.

Nel caso studio si è scelto di posizionare il punto di rilevamento (coordinate condivise) e il punto base di progetto su di uno spigolo all'imbocco della galleria individuato nella nuvola di punti. Per fare ciò è stato utilizzato lo strumento *specifica coordinate del punto* con il quale è stato possibile creare il collegamento tra Autodesk Revit e la nuvola di punti georeferenziata.

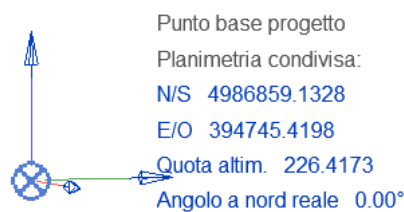


Figura 7-9 Coordinate del punto base di progetto del caso studio.

La nuvola di punti una volta caricata per iniziare la modellazione non è più modificabile, ma può essere solamente spostata e ruotata. Per agevolare il lavoro di modellazione si è scelto di bloccare la nuvola di punti e creare dei piani di riferimento in corrispondenza di alcuni elementi presenti nel tunnel quali staffe per dispositivi di illuminazione e staffe per passerelle cavi come descritto nel dettaglio nel seguente capitolo.

## 8. Sviluppo del modello 3D BIM

### 8.1 Metodologia BIM applicato al Caso Studio

Di seguito è illustrata la procedura utilizzata per creare un modello in Revit contenente dati e informazioni utili per il monitoraggio e la manutenzione di un'opera infrastrutturale. Tali dati possono essere implementati, revisionati e adeguati al progetto di interventi di manutenzione del Sottopasso Lingotto.

Per creare il modello del tratto di tunnel considerato in un primo step è stato creato il modello strutturale successivamente sono stati modellati e posizionati gli elementi principali del tunnel (dispositivi di illuminazione, elementi di arredo, segnaletica verticale, ecc.).

Di seguito viene riportato il flowchart del workflow seguito (Figura 8-1).

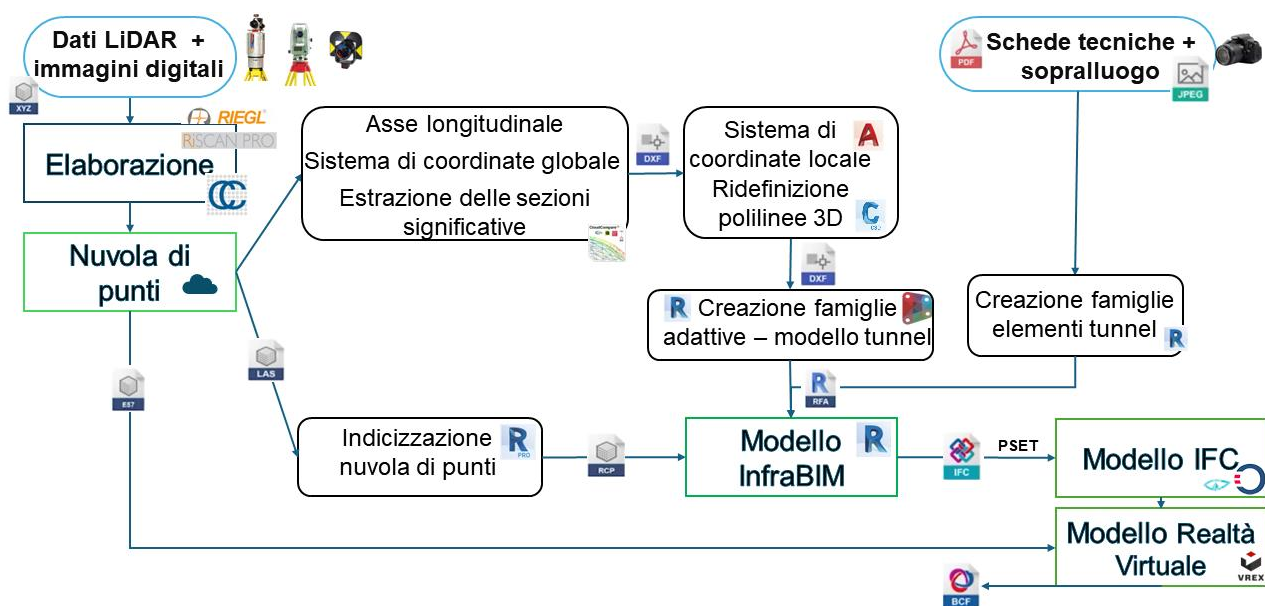


Figura 8-1 Workflow seguito per il caso studio.

### 8.2 Modello strutturale del tunnel

La modellazione degli elementi strutturali del tunnel è stata fatta per steps successivi:

1. importazione nel software Autocad delle polilinee 3D e "slice clouds" in formato .dxf esportate da CloudCompare all'interno del quale:
  - è stato definito un Sistema di Coordinate Utente (locale) tramite il comando *UCS* (*User Coordinate System*) in Autocad con asse "y" parallelo all'asse longitudinale del tunnel e il piano "oxz" parallelo al piano di sezione della prima "slice" di nuvola di punti relativa alla prima sezione; tale comando consente di cambiare la posizione del punto di origine 0,0,0 di un sistema di coordinate così come l'orientamento del piano "oxy" e dell'asse z tramite una rototraslazione nello spazio;
  - è stata creata una griglia rossa nel piano "oxz" con maglia quadrata di 0,5 cm (Figura 8-2);
  - è stata ridefinita la polilinea relativa al piano stradale e i piedritti del tunnel seguendo la point cloud;

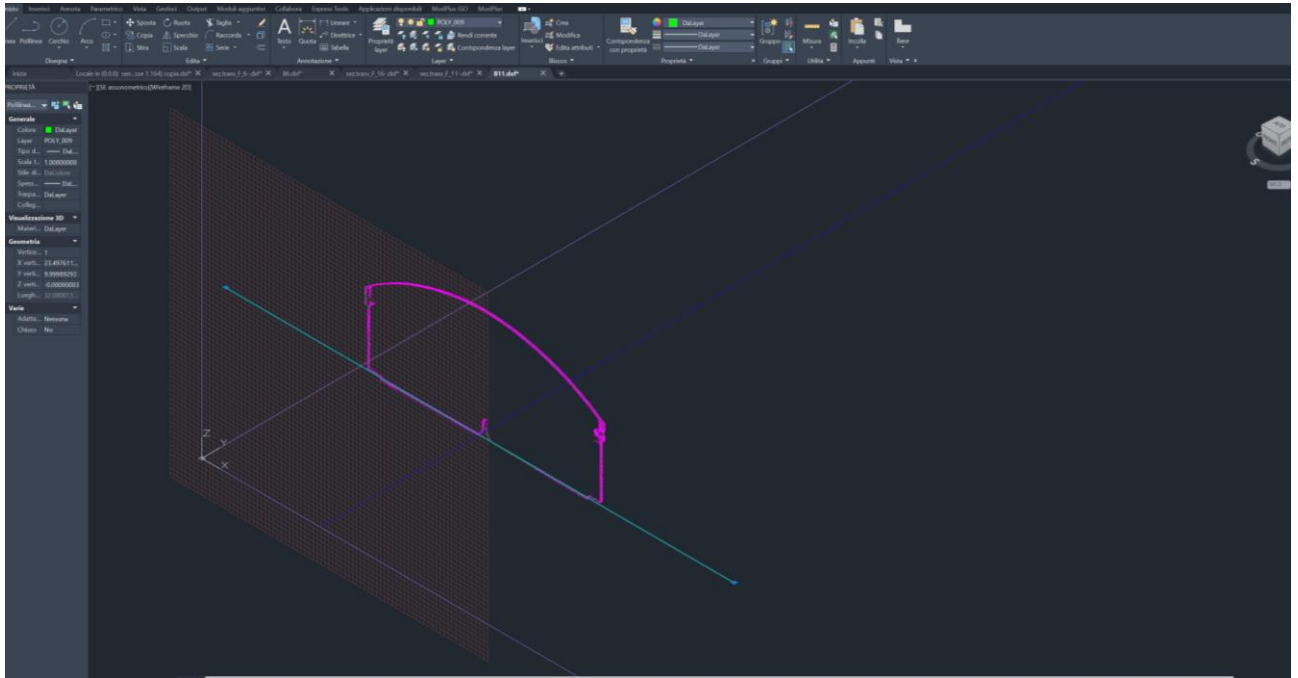


Figura 8-2 Esempio di polilinee e slice della nuvola di punti esportate da CloudCompare in Autocad della sezione trasversale alla progressiva  $y = 10$  m dall'origine del sistema locale OXYZ con asse principale del tunnel (colore blu) e traccia del piano di sezione utilizzata in CloudCompare (colore ciano) e griglia (colore rosso scuro) nel piano OXZ.

- estrapolazione delle coordinate del punto in basso a sinistra, ovvero lo spigolo dove termina il piedritto ed inizia il marciapiede di ogni sezione (Figura 8-3). Questo punto è stato individuato per considerare l'informazione legata sia alla quota sia all'allineamento di ciascuna sezione. Grazie alla griglia creata è stato possibile verificare più rapidamente le corrette coordinate di ciascun punto nel piano "oxz".

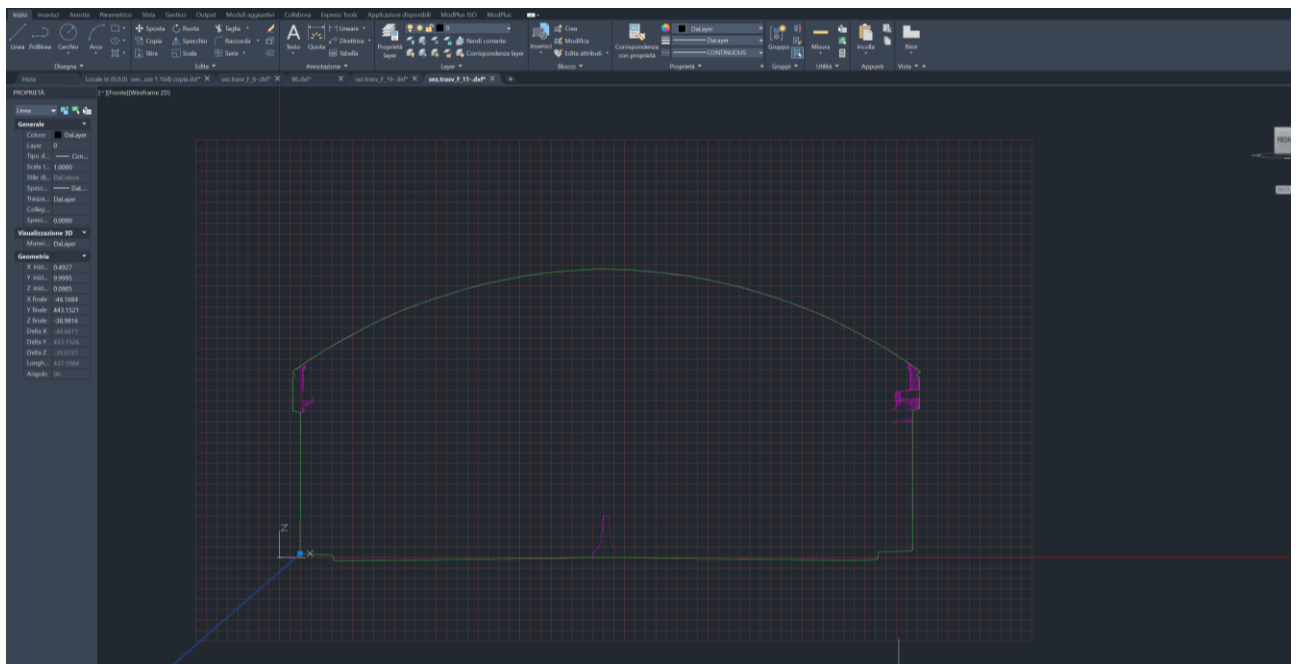


Figura 8-3 Sezione trasversale alla progressiva  $y = 10$  m dall'origine del sistema locale con griglia per individuare le coordinate del punto di inserimento in basso a sinistra della sezione.

Di seguito vengono riportate le coordinate del punto in basso a sinistra di ogni sezione nel sistema di riferimento locale creato (Figura 8-4).

| <b>UCS LOCALE</b>      |              |              |              |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Progressiva [m]</b> | <b>X [m]</b> | <b>Y [m]</b> | <b>Z [m]</b> |
| <b>1</b>               | 0.591        | 1.000        | 0.028        |
| <b>5</b>               | 0.507        | 5.000        | 0.054        |
| <b>10</b>              | 0.493        | 10.000       | 0.095        |
| <b>15</b>              | 0.501        | 15.000       | 0.141        |
| <b>20</b>              | 0.493        | 20.000       | 0.169        |
| <b>25</b>              | 0.490        | 25.000       | 0.181        |
| <b>30</b>              | 0.481        | 30.000       | 0.183        |
| <b>35</b>              | 0.481        | 35.000       | 0.194        |
| <b>40</b>              | 0.483        | 40.000       | 0.212        |
| <b>45</b>              | 0.491        | 45.000       | 0.228        |
| <b>50</b>              | 0.483        | 50.000       | 0.207        |
| <b>55</b>              | 0.481        | 55.000       | 0.210        |
| <b>60</b>              | 0.481        | 60.000       | 0.224        |
| <b>65</b>              | 0.460        | 64.999       | 0.239        |
| <b>70</b>              | 0.475        | 69.999       | 0.211        |
| <b>75</b>              | 0.471        | 74.999       | 0.208        |
| <b>80</b>              | 0.468        | 79.999       | 0.198        |
| <b>85</b>              | 0.473        | 84.999       | 0.209        |
| <b>90</b>              | 0.481        | 89.999       | 0.217        |
| <b>95</b>              | 0.479        | 94.999       | 0.246        |
| <b>100</b>             | 0.477        | 99.999       | 0.231        |
| <b>105</b>             | 0.486        | 104.999      | 0.244        |
| <b>110</b>             | 0.483        | 109.999      | 0.204        |
| <b>115</b>             | 0.488        | 114.999      | 0.191        |
| <b>120</b>             | 0.486        | 119.999      | 0.209        |
| <b>125</b>             | 0.490        | 124.999      | 0.212        |
| <b>130</b>             | 0.497        | 129.999      | 0.185        |
| <b>135</b>             | 0.489        | 134.999      | 0.178        |
| <b>140</b>             | 0.500        | 139.999      | 0.186        |
| <b>145</b>             | 0.498        | 144.999      | 0.194        |
| <b>150</b>             | 0.488        | 149.999      | 0.191        |
| <b>155</b>             | 0.172        | 154.999      | 0.225        |
| <b>160</b>             | -0.419       | 159.999      | 0.277        |
| <b>163</b>             | -0.818       | 162.999      | 0.309        |

Figura 8-4 Coordinate dei punti di inserimento delle 34 sezioni modellate in Revit nel sistema di riferimento locale.

2. importazione in Autodesk Civil 3D e ridefinizione della polilinea relativa alla volta (intradosso della copertura) del tunnel riducendo il numero di vertici tramite il comando “weedfeatures” (Figura 8-5). Ciò è stato fatto per poter utilizzare la stessa polilinea 3D nel definire la geometria della volta e per non appesantire il modello.

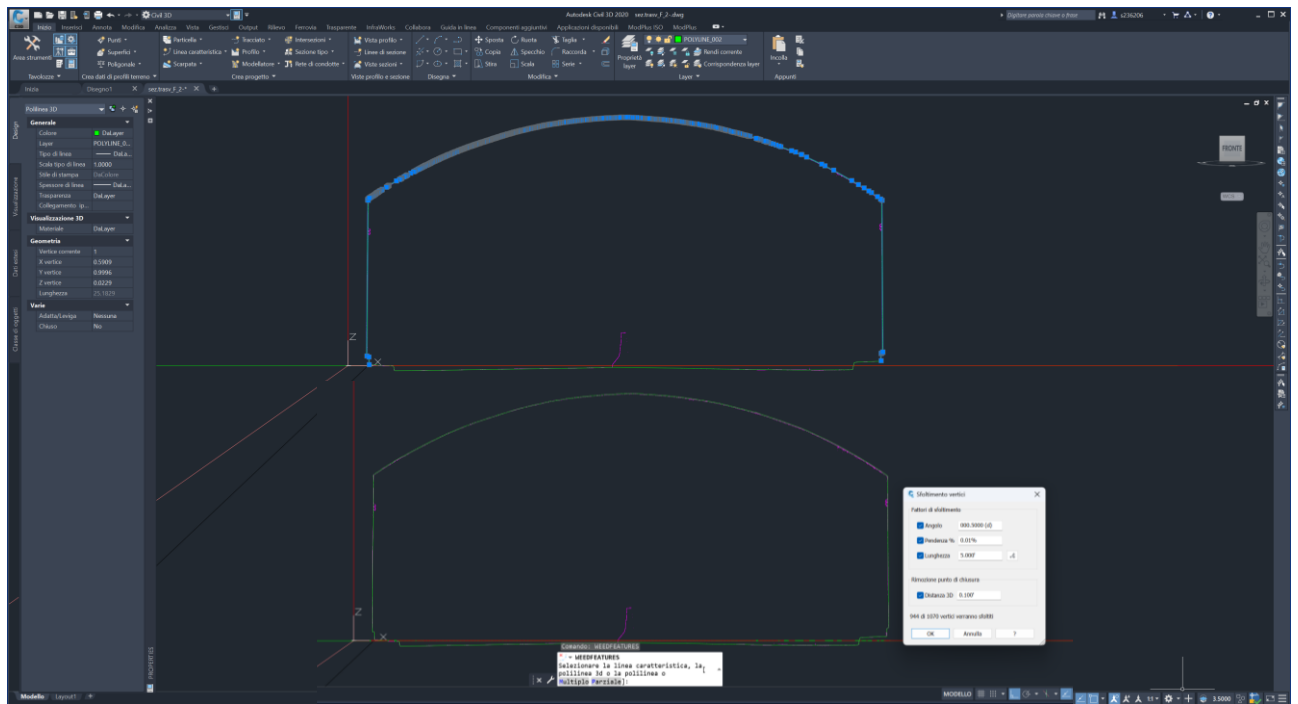


Figura 8-5 Sezione alla progressiva  $y = 1$  m dall'origine del sistema di riferimento locale scelto.

- una volta definiti i vari profili necessari per la modellazione sono stati importati in Revit in formato .dxf. Ciascuno di essi contiene una "slice" della nuvola di punti e la polilinea della sezione divisa in due parti (volta e piedritti, pavimentazione e marciapiedi) oltre al sistema di riferimento locale necessario per il corretto posizionamento. Inoltre, grazie al sistema di riferimento locale creato, importando in Revit il file .dxf si è conservata l'informazione legata al punto di inserimento di ciascuna sezione e quindi la definizione del tracciato (*Alignment*) del tunnel. Per creare il profilo in Revit legato a ciascuna sezione scelta è stata creata una nuova famiglia con il template "modello generico metrico". Una volta aperta la famiglia, in vista prospettica è stato importato il file CAD in formato .dxf impostando la modalità "Automatico – da origine a origine interna", l'unità di misura in metri e lasciando invariati gli altri parametri. In questo modo è stata conservata l'informazione legata al posizionamento della singola sezione rispetto al sistema di riferimento locale scelto nel piano "oxz". Infine, ricalcando le polilinee e seguendo la nuvola di punti sono stati creati due profili chiusi (Figura 8-6), il primo per la calotta e le pareti con un offset di 0,35 m, il secondo per il piano stradale e i marciapiedi.



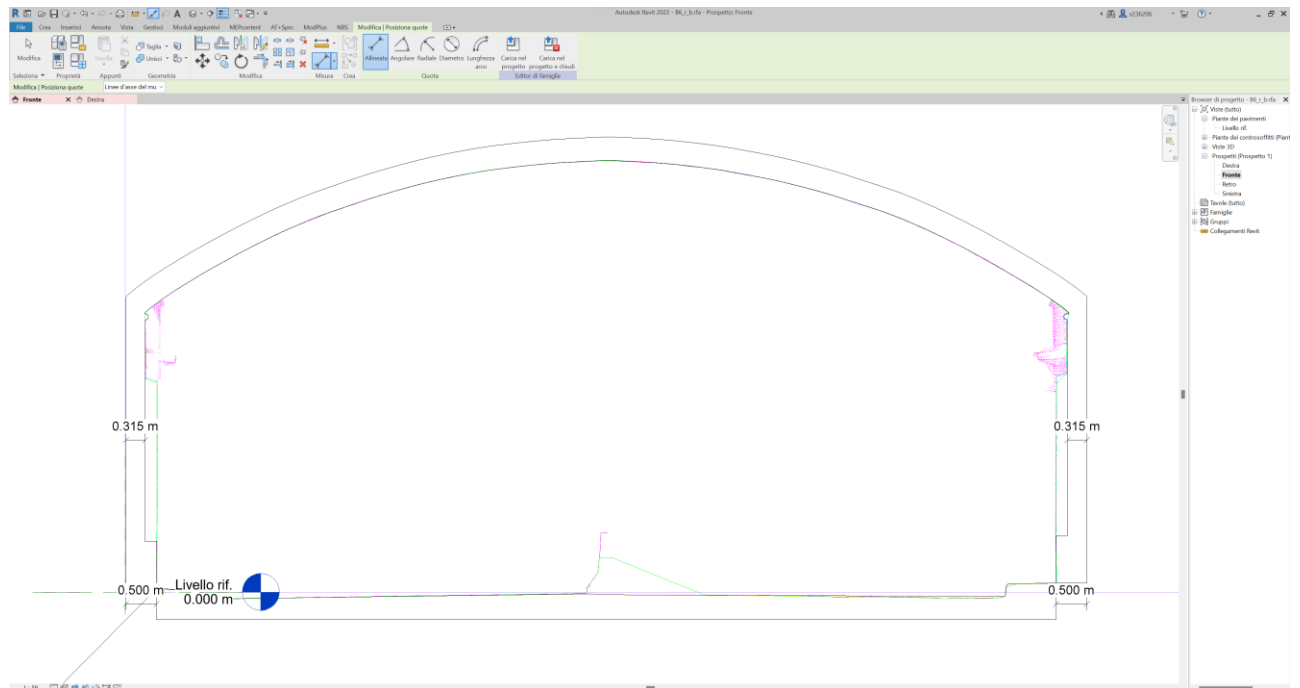


Figura 8-6 Importazioni in Revit della "slice" di nuvola di punti, delle due polilinee esportate da CloudCompare e definizione dei due profili chiusi relativi alla pavimentazione e la calotta e pareti della sezione a progressiva Y=5 m nel sistema di riferimento locale.

Tuttavia, a causa del diverso materiale, i marciapiedi sono stati modellati a parte creando due profili chiusi separati dal resto della pavimentazione. Per ciascuna sezione scelta, quindi, si è utilizzata la *slice* di nuvola di punti per la costruzione semantica della geometria principale della galleria. In particolare, sono stati definiti i profili con cui modellare separatamente i quattro elementi strutturali del tunnel scelti, quali:

- *piedritti e volta del sottopasso;*
  - *piano stradale;*
  - *marciapiede sinistro;*
  - *marciapiede destro.*
4. per modellare i 4 elementi strutturali scelti, le singole famiglie sono state salvate eliminando la *"slice"* di nuvola di punti utilizzate per definire i profili e sono state importate a coppie in una nuova famiglia. Tale famiglia è stata costruita utilizzando il template *"modello generico metrico adattivo"*. Una famiglia adattiva è una particolare famiglia che permette di adattare la geometria su punti definiti nel modello detti *punti adattivi* e di automatizzare la modellazione di elementi tipici delle infrastrutture lineari; la geometria viene basata su tali punti, i quali definiscono un sistema di coordinate che consente di posizionare correttamente la famiglia modellata. Per la realizzazione delle varie famiglie adattive sono stati definiti il numero di punti necessari in questo caso pari a due, e sono state caricate all'interno le due famiglie relative ai due profili di inizio e di fine posizionate nei rispettivi punti adattivi. È stato necessario porre particolare attenzione riguardo alla scelta dei punti (equidistanziati di 5 m), all'impostazione delle loro proprietà con i vincoli per mantenere la verticalità con i punti di posizionamento e il corretto inserimento dei vari profili sui punti adattivi. Infine, sono stati selezionati a coppie i profili e creato il solido per estrusione. Di seguito in *Figura 8-7* viene mostrato un esempio di calotta e piedritti della seconda sezione (*6-11\_TRIAL2.rfa*) con i profili importati per definire la geometria del solido (*B6\_r\_u-.rfa* e *B11\_r\_u-.rfa*).

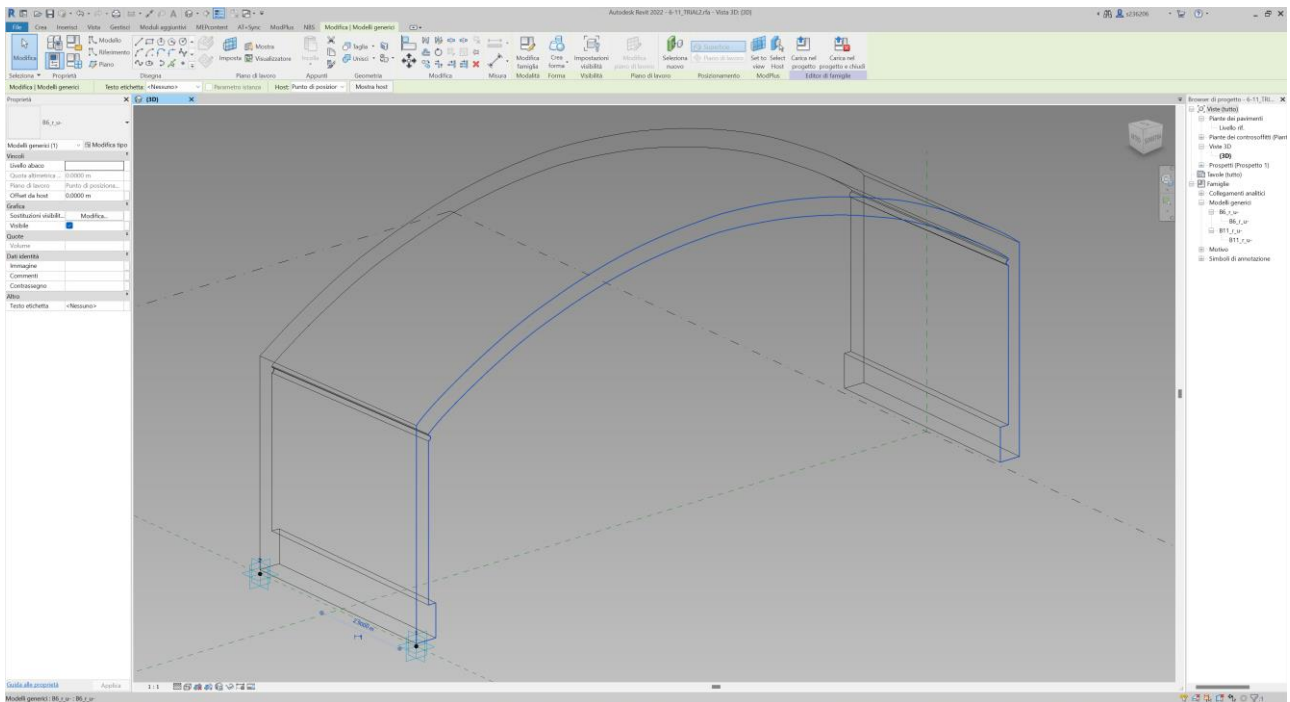


Figura 8-7 Modellazione della calotta e delle pareti tramite la creazione di una famiglia parametrica adattiva e assegnazione del materiale: calcestruzzo gettato in opera – C45.

In modo analogo sono stati modellati i marciapiedi destro e sinistro di ogni singola sezione e il piano stradale. Per ciascun elemento modellato, infine, è stato assegnato un materiale.

Di seguito in *Figura 8-8* e *Figura 8-9* rispettivamente vengono riportati un esempio di marciapiede sinistro e un esempio di pavimentazione con assegnazione dei materiali. Per ogni elemento del tunnel è stato assegnato il materiale attraverso il *Browser dei materiali*; si è scelta quindi la tipologia del materiale e tutte le informazioni relative al materiale scelto quali *identità, grafica, aspetto, fisico* e *termico*. In particolare, nella scheda *aspetto* è stato scelto il colore per la visualizzazione dell' modello IFC necessario per una corretta visualizzazione nella Realtà Virtuale.

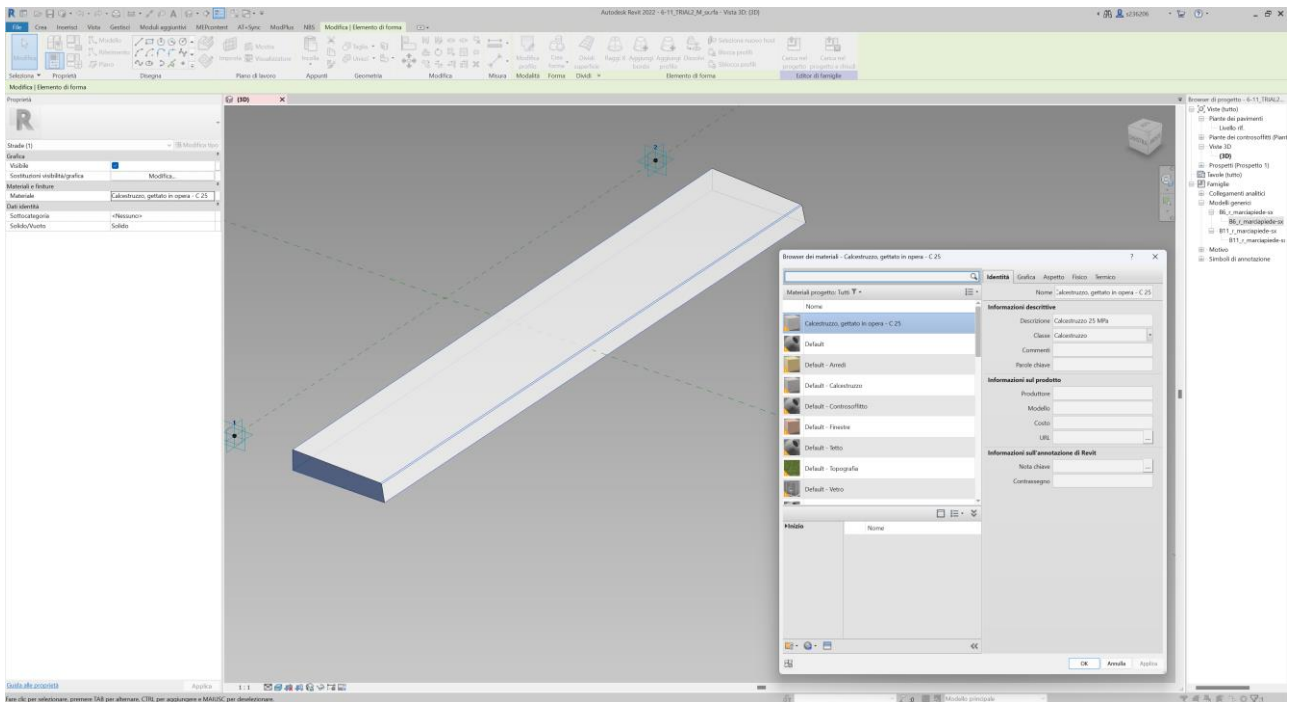


Figura 8-8 Esempio di marciapiede sx (6-11\_TRIAL2\_M\_sx.rfa) modellato come famiglia parametrica adattiva e assegnazione del materiale: calcestruzzo gettato in opera – C25.

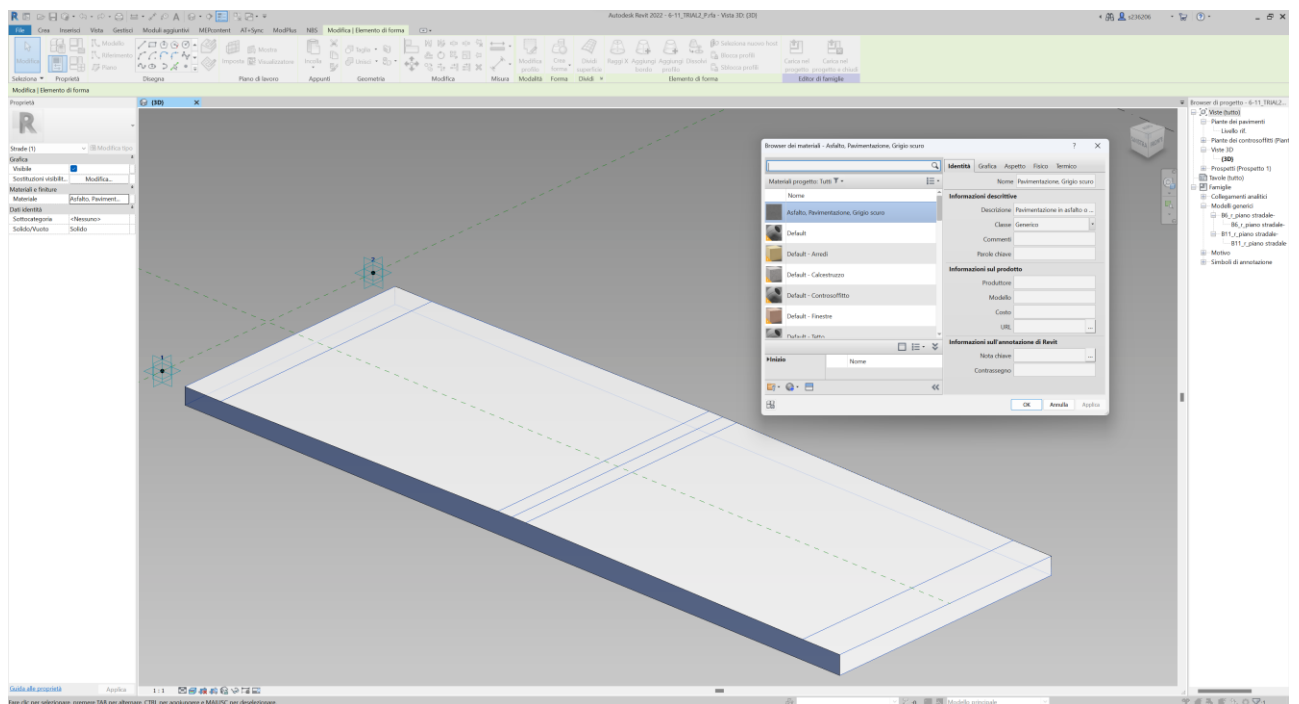


Figura 8-9 Esempio di pavimentazione stradale (6-11\_TRIAL2\_P.rfa) modellata come famiglia parametrica adattiva e assegnazione del materiale asfalto pavimentazione grigio scuro.

Per ogni singola sezione è stata creata una famiglia *nidificata* ovvero una famiglia formata dall'unione di una famiglia all'interno di un'altra famiglia (Figura 8-10). Nel caso in esame la famiglia ( $j-j+5\_TRIAL2\_P.rfa$ ) relativa alla pavimentazione e le due famiglie relative rispettivamente ai marciapiedi sinistro e destro ( $j-j+5\_TRIAL2\_M\_sx.rfa$ ) e ( $j-j+5\_TRIAL2\_M\_dx.rfa$ ) sono state inserite all'interno della famiglia ( $j-j+5\_TRIAL2\_P.rfa$ ) della parte di struttura composta da volta e piedritti definendo quindi una famiglia adattiva nidificata ( $j-j+5\_TRIAL2\_PM.rfa$ ) dove  $j=1-160$  indica la progressiva della prima sezione.

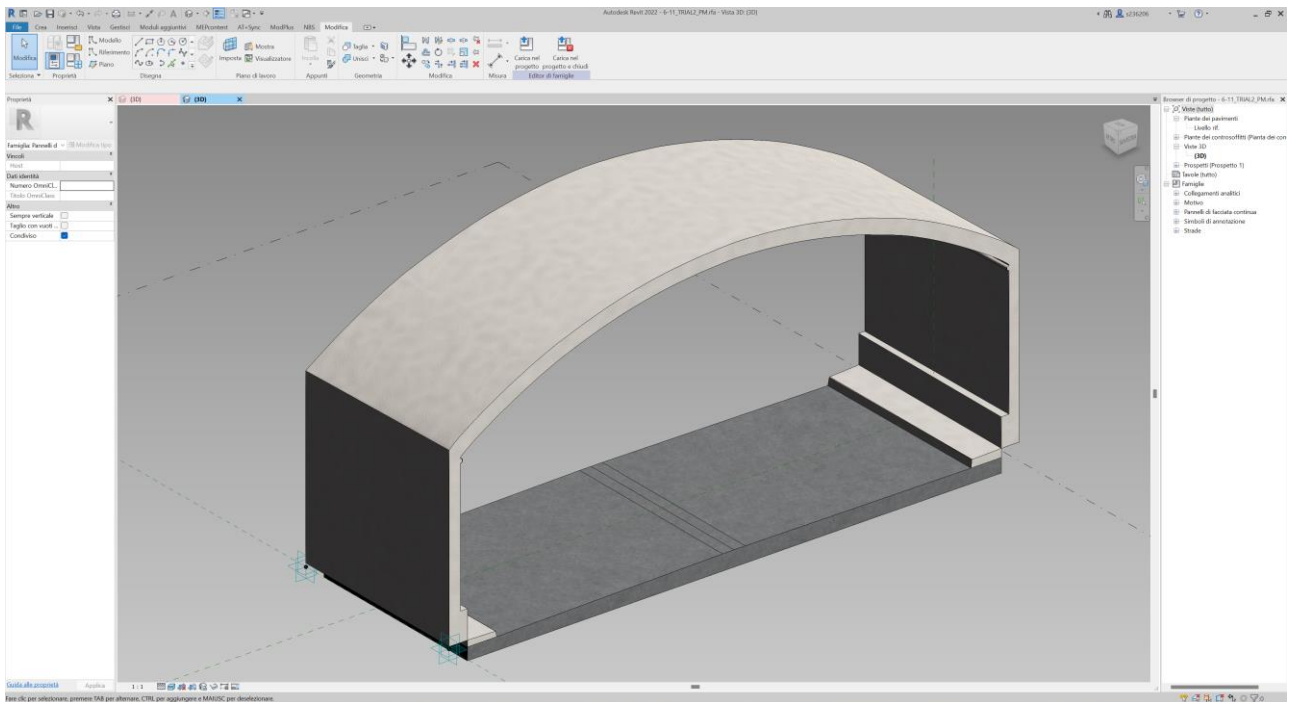


Figura 8-10 Esempio di famiglia adattiva nidificata di una sezione di 5 m del tunnel (6-11\_TRIAL2\_PM.rfa).

### 8.2.1 Modellazione della galleria tramite Dynamo

Una volta creata per ciascuna sezione una famiglia parametrica adattiva nidificata per creare la parte strutturale della galleria si è utilizzato Dynamo. Dalla scheda *Gestisci*, gruppo *Programmazione Visiva*, si è attivato lo strumento *Lettores Dynamo* nel quale è stato creato lo script per la modellazione della parte strutturale del Tunnel.

Dynamo, plug-in per Autodesk Revit, è un *ambiente di programmazione visuale* open source utilizzato principalmente per la modellazione di geometrie complesse, per la gestione delle informazioni contenute nel modello BIM e per automatizzare le operazioni ripetitive da dover eseguire manualmente. Per programmazione visuale si intende una modalità operativa che prevede la manipolazione e il collegamento di entità grafiche funzionali detti *nodi*. I nodi sono entità elementari con cui si opera in Dynamo per costruire la “definizione” ovvero l’algoritmo (una serie di passaggi svolti in sequenza) per automatizzare un processo. Ciascun nodo prevede uno o più input o output, che prendono il nome di porte. Gli input sono posizionati nella parte sinistra mentre gli output a destra, esattamente come il flusso con cui viene realizzata la definizione in Dynamo, da sinistra a destra.

A seconda del tipo di nodo, le porte richiedono una specifica tipologia di dati in ingresso:

- numeri interi o *Double* (decimali);
- stringhe di testo ovvero una sequenza di caratteri alfanumerici;
- *Booleane* ovvero solo due valori vero e falso.

Il nodo per la creazione di un punto a partire dalle sue coordinate cartesiane, ad esempio, prevede in input un valore numerico (*Figura 8-11*).

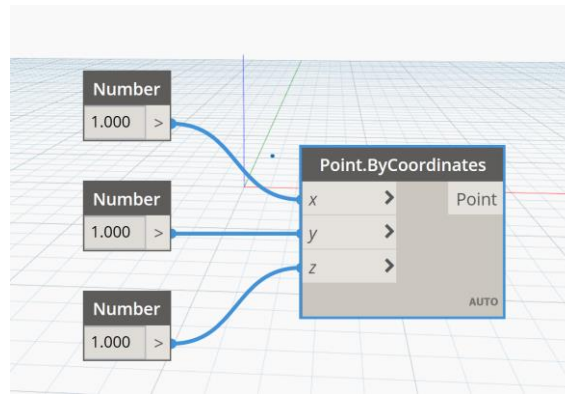


Figura 8-11 Esempio di nodo "Point.ByCoordinates" in Dynamo per la generazione di un punto dalle sue coordinate cartesiane. A sinistra le porte di input a destra le porte di output.

Creando il collegamento attraverso un elemento grafico detto "wire" tra i singoli nodi posizionati all'interno dell'area di lavoro prende forma la "definizione". L'output di un nodo può essere visualizzato tramite l'anteprima (riquadro rosso) o tramite il nodo specifico denominato "Watch" (Figura 8-12).

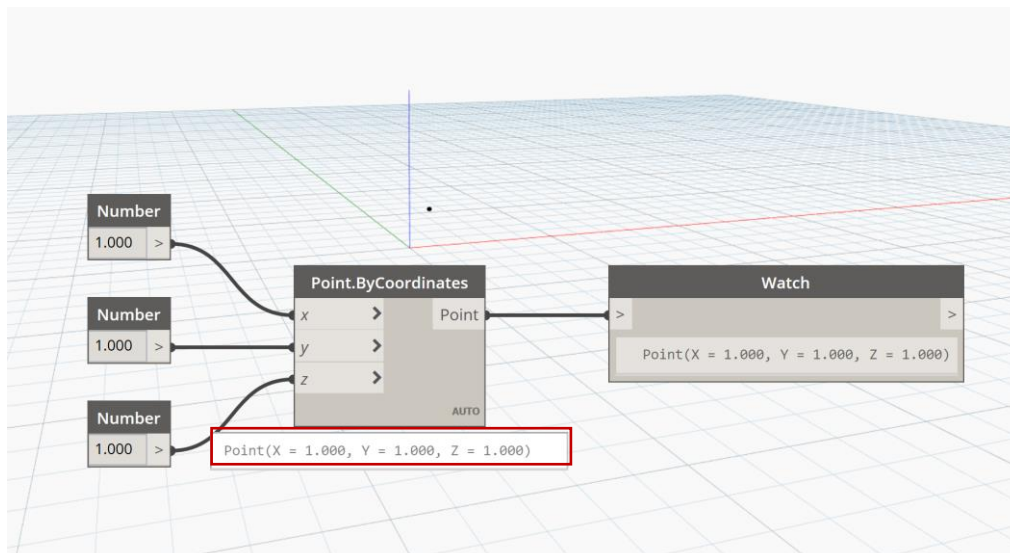


Figura 8-12 Visualizzazione dell'output di un nodo tramite l'anteprima o tramite apposito nodo "Watch" nel lettore Dynamo di Revit.

Nel caso in esame Dynamo è stato impiegato per la modellazione strutturale della galleria; nello specifico, sono state unite le 34 sezioni scelte. Per quanto riguarda l'andamento altimetrico del tracciato del tunnel (*Alignment*) è già stato considerato nella fase di importazione delle sezioni in Revit come già spiegato. L'andamento planimetrico, invece, è stato determinato in Autocad calcolando l'orientamento della nuvola di punti nel sistema di riferimento globale (WCS) ovvero l'angolo tra l'asse longitudinale del tunnel e l'asse Y nel sistema di coordinate globale. Di seguito vengono riportati gli steps seguiti per la modellazione con Dynamo della parte strutturale del tunnel e lo script utilizzato:

- creazione di punti e gestione delle loro coordinate a una data distanza rispetto al punto base di progetto e definizione dell'*Alignment* in modo tale da seguire la nuvola di punti (Figura 8-13);
- gestione delle liste di punti (Figura 8-14);
- collocazione delle famiglie adattive nei punti creati (Figura 8-15).

### Creazione dei punti adattivi con una certa distanza e orientati

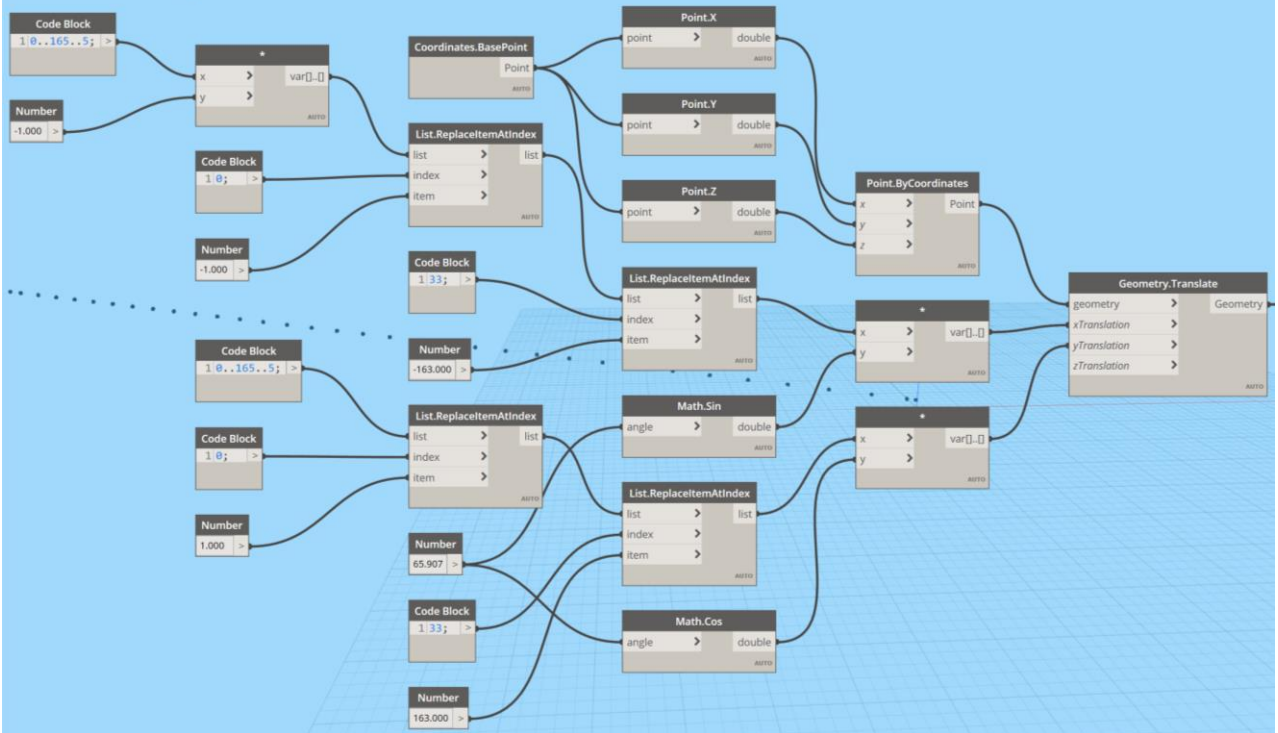


Figura 8-13 Estratto dello script utilizzato in Dynamo per la creazione della galleria: prima parte dello script, creazione di punti con una certa distanza e orientati utilizzando un linguaggio di programmazione visuale (VPL) tramite nodi funzionali e collegamenti logici.

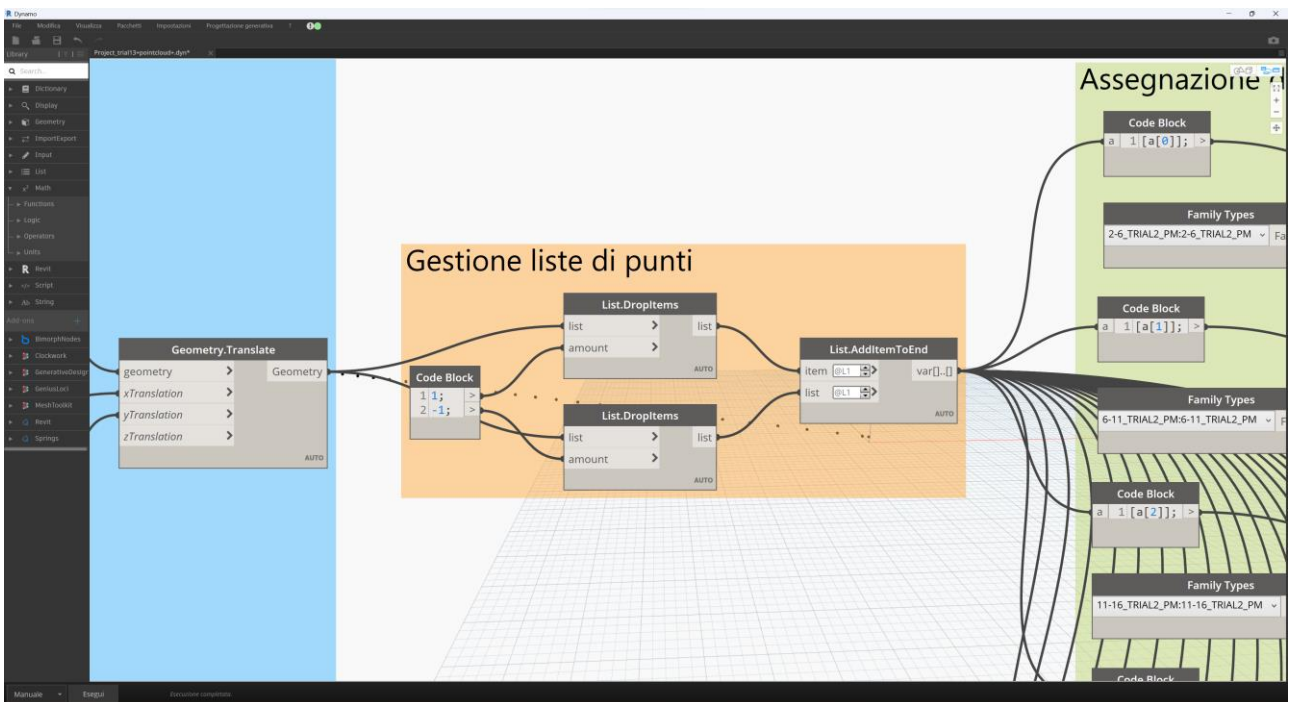


Figura 8-14 Estratto dello script in Dynamo per la creazione della galleria: seconda parte dello script, gestione delle liste di punti per l'inserimento delle famiglie adattive.

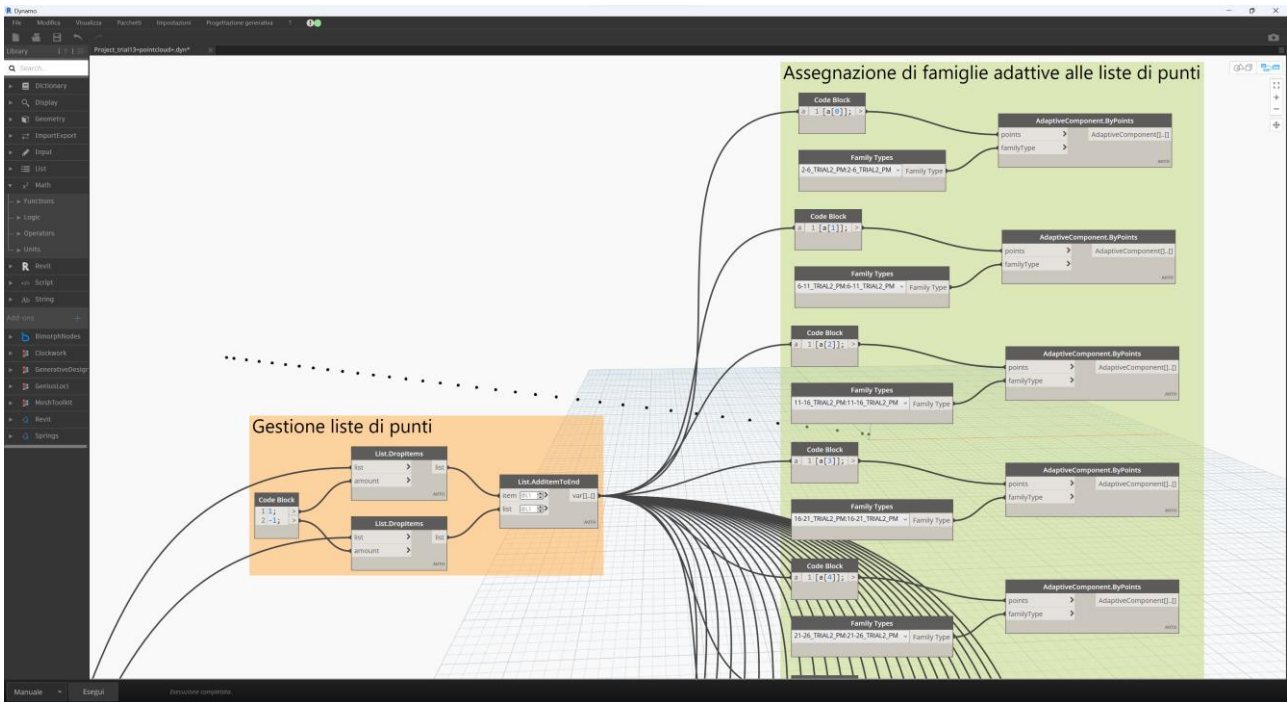


Figura 8-15 Estratto dello script in Dynamo per la creazione della galleria: terza parte dello script, assegnazione delle famiglie adattive nei punti creati.

All'interno dell'ambiente Dynamo sono stati visualizzati i punti di inserimento nello spazio 3D delle famiglie adattive distanziati di 5 m l'una dall'altra tranne la prima distanziata di 4 m dalla seconda e l'ultima distanziata di 3 mt dalla penultima sezione (Figura 8-16) secondo l'orientamento della nuvola di punti nello spazio tridimensionale.

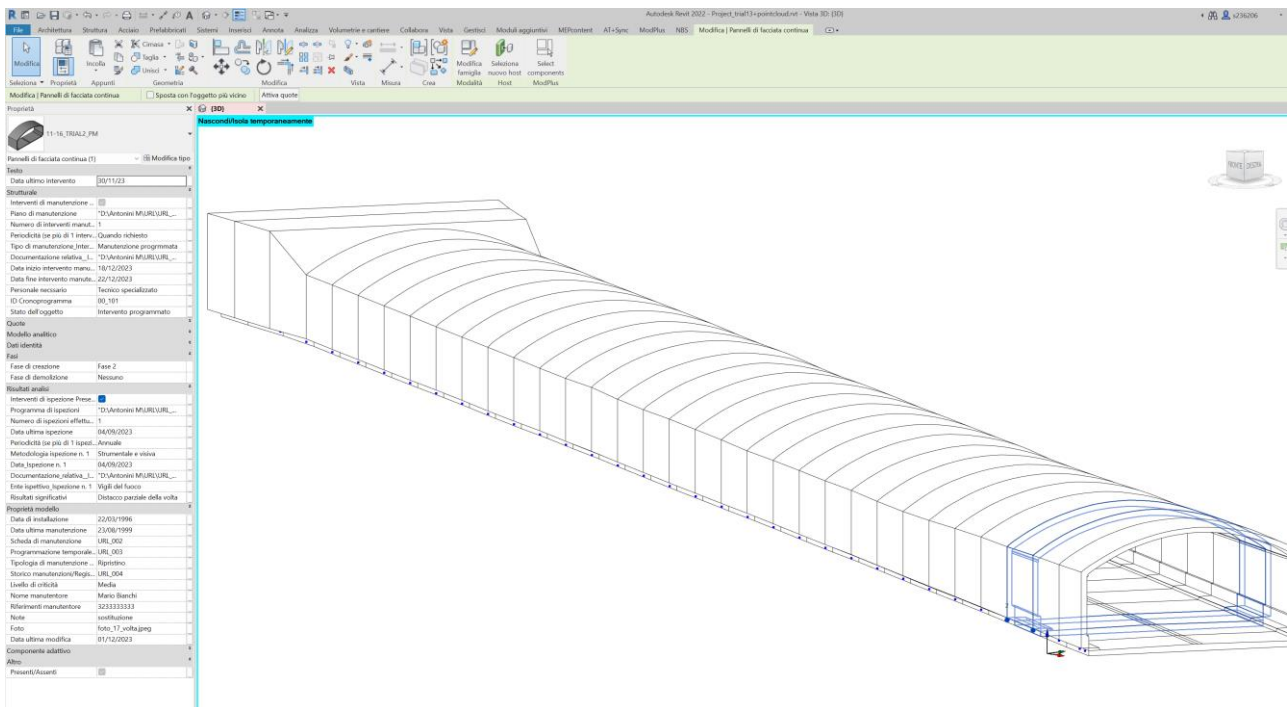


Figura 8-16 Posizionamento in sequenza delle varie famiglie adattive relative alla parte strutturale della galleria in corrispondenza dei punti adattivi in Revit.

Di seguito viene riportato il modello 3D del tunnel con i soli elementi strutturali e le coordinate del punto base di progetto.

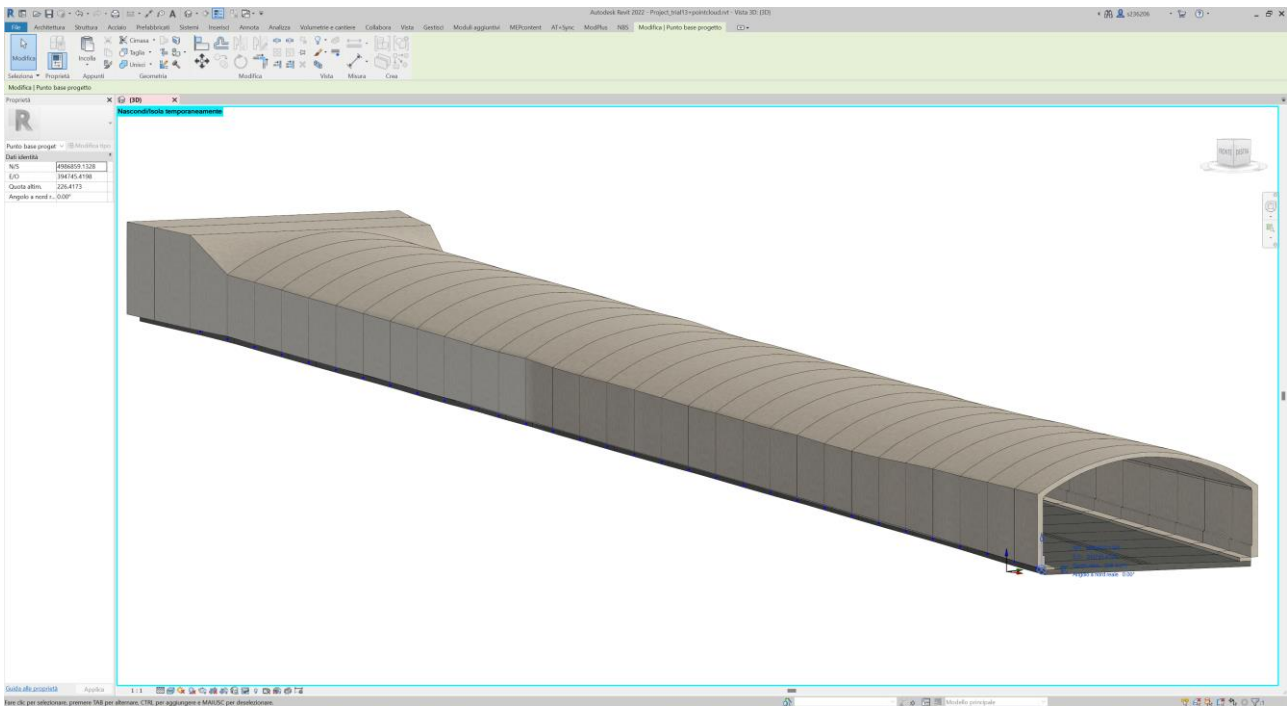


Figura 8-17 Modello strutturale 3D del tunnel in Revit nel sistema di riferimento globale e coordinate del punto base di progetto.

### 8.3 Modellazione degli elementi del tunnel

Una volta definita la struttura del tunnel sono stati modellati alcuni degli elementi principali presenti al suo interno, quali (Figura 8-18):

- *New Jersey;*
- *pannelli fonoassorbenti e fonoisolanti;*
- *porte;*
- *segnaletica verticale;*
- *bocca di aereazione;*
- *passerella passa cavi;*
- *staffe passerella cavi;*
- *dispositivi di illuminazione;*
- *staffe per i dispositivi di illuminazione;*
- *derivatori;*
- *chiusini pozzetti.*

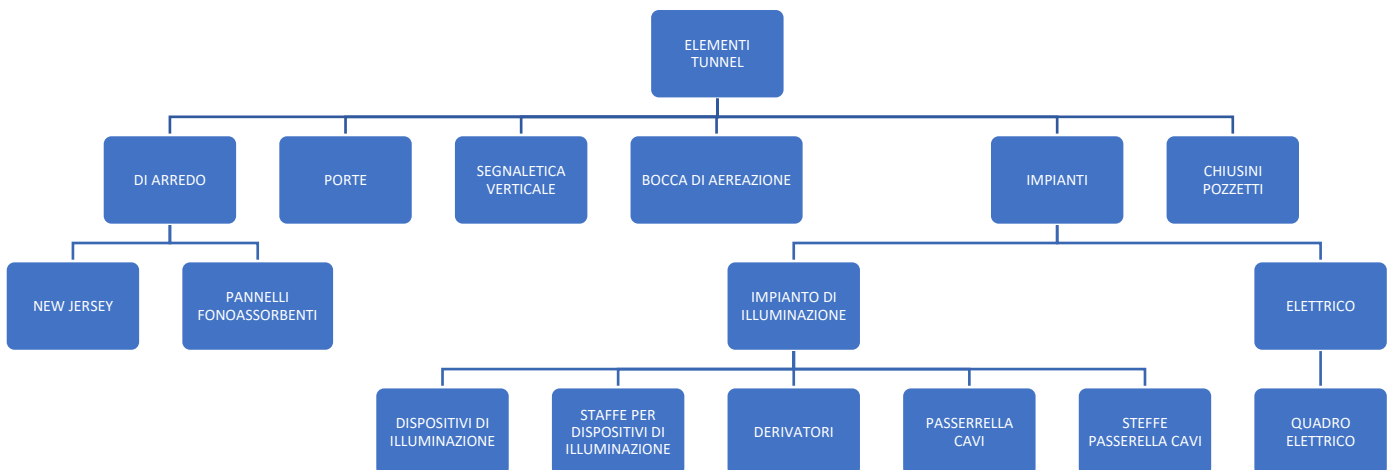


Figura 8-18 Elementi del tunnel modellati.



Tutti gli elementi sopraelencati necessitano di manutenzione, sia di tipo correttivo in seguito a guasto che di tipo programmato per verifiche o controlli periodici.

La modellazione degli elementi è stata fatta in funzione degli obiettivi prefissati. Pertanto, è stato stabilito il LOD (Level of Detail o Level of Development) di ciascun elemento del modello. Ai fini di gestione e manutenzione di tali elementi da parte del gestore si è scelto di garantire un livello di dettaglio (LOD C) inserendo le informazioni geometriche e descrittive necessarie per la gestione e la manutenzione dell'Asset.

Per la modellazione di ciascun elemento è stata scelta la famiglia e il relativo modello (template) più appropriato in base alla disciplina, alla categoria scelta e alla modalità di inserimento e all'interno del modello strutturale del tunnel stradale (Tabella 8-1).

| NOME FAMIGLIA                                  | CATEGORIA REVIT               | TEMPLATE UTILIZZATO                           |
|--|-------------------------------|---|
| Pavimentazione                                 | Strade                        | Famiglia adattiva                             |
| Marciapiede                                    | Strade                        | Famiglia adattiva                             |
| Piedritti e volta                              | Pannelli di facciata continua | Famiglia adattiva                             |
| Pavimentazione, marciapiedi, pareti e calotta  | Pannelli di facciata continua | Famiglia nidificata adattiva                  |
| Bocca di aereazione                            | Telaio strutturale            | Modello generico metrico basato su superficie |
| New Jersey                                     | Dispositivi di sicurezza      | Modello generico metrico basato su superficie |
| Pannelli fonoassorbenti e fonoisolanti         | Arredi fissi                  | Modello generico metrico basato su superficie |
| Porte  | Porte                         | Modello generico metrico basato su superficie |
| Staffe passerella cavi                         | Accessori per tubazioni       | Modello generico metrico                      |
| Passerella passa cavi                          | Raccordi passerella           | Modello generico metrico basato su superficie |
| Staffe lampada Galileo 1 e Galileo 2 EB Tunnel | Arredi                        | Modello generico metrico basato su superficie |
| Lampada Galileo 1 e Galileo 2 EB Tunnel        | Apparecchi per illuminazione  | Dispositivo di illuminazione metrico          |
| Derivatori                                     | Apparecchi elettrici          | Modello generico metrico basato su superficie |
| Segnaletica verticale                          | Segnaletica                   | Modello generico metrico basato su superficie |
| Tombini  | Accessori per tubazioni       | Modello generico metrico basato su superficie |

Tabella 8-1 Nome delle famiglie, categorie scelte e template utilizzati per modellare gli elementi del sottopasso Lingotto.

Una famiglia in Revit è un gruppo di elementi con un insieme comune di parametri (proprietà) che possono assumere valori differenti; lo strumento logico che raggruppa gli insiemi di parametri e le relative variazioni di valore è il Tipo. L'istanza, invece, rappresenta l'ultimo passaggio della gerarchia che porta all'identificazione dell'elemento all'interno di Revit: una volta scelta la Famiglia e il Tipo, l'inserimento dello specifico elemento nell'ambiente di progetto è detta Istanza (Figura 8-19).

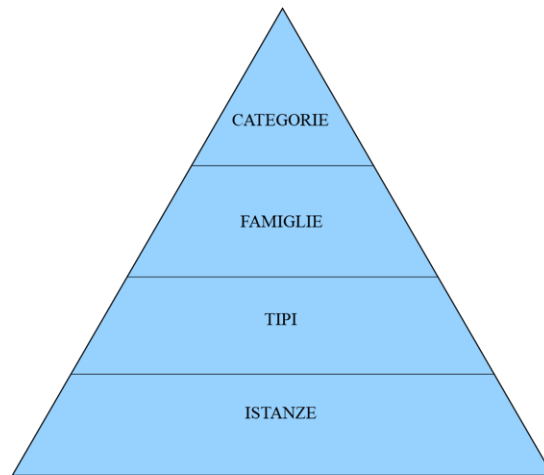


Figura 8-19 Gerarchia degli elementi in Revit.

Ai vari elementi in funzione della specifica disciplina (strutturale, architettonica, impiantistici) è stata assegnata la categoria. Le categorie standardizzate in Revit 2022 (Figura 8-20) consentono di raggruppare gli elementi che presentano caratteristiche comuni.

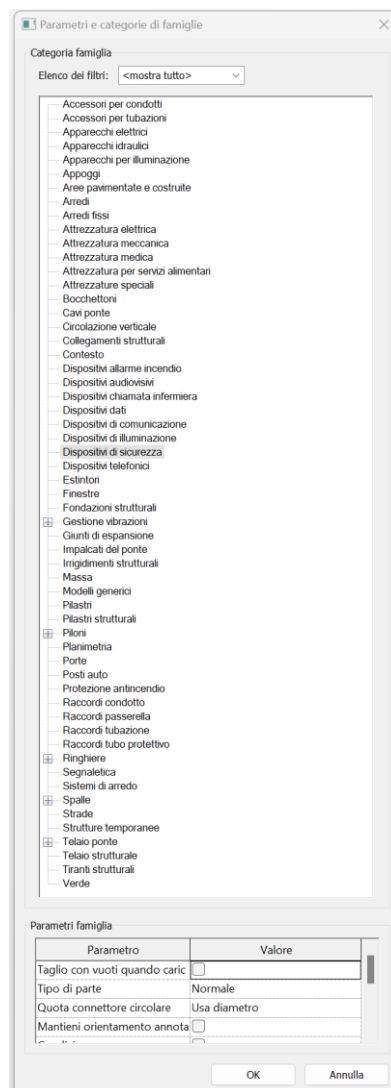


Figura 8-20 Categorie in Autodesk Revit 2022.

Le famiglie, invece, si suddividono in famiglie di *sistema* e famiglie *caricabili*. Le famiglie di sistema sono predefinite e vengono impostate tramite finestre di dialogo che ne contengono unicamente i

parametri; non possono essere create, copiate, modificate o eliminate ma è possibile solo aggiungere e modificarne i tipi. Le famiglie caricabili, invece, vengono create partendo da un modello (template) scelto in funzione del progetto e della necessità dell'utente e modificate attraverso l'utilizzo dell'Editor di Famiglie nel quale vengono disegnate e parametrizzate. Tali famiglie non risiedono all'interno del file di progetto o modello ma vengono salvate in archivi esterni (librerie) con estensione .rfa. Questo consente l'inserimento nel progetto solo delle famiglie necessarie alla definizione del manufatto, senza appesantire il file di progetto.

Tutti gli elementi inseriti all'interno del progetto quali arredi del tunnel (New Jersey, pannelli fonoassorbenti), impianto di illuminazione, segnaletica verticale, ecc. sono stati creati utilizzando famiglie caricabili. Per ogni elemento del tunnel in Revit, una volta definita la geometria, tramite l'Editor delle Famiglie è stato modellato utilizzando i comandi per la creazione di solidi e vuoti attraverso metodi di estrusione, unione su percorso e rivoluzione. Ogni elemento inserito nel progetto costituisce un'istanza che occupa una posizione specifica nella galleria. Ad ogni famiglia partendo dalla categoria nativa "modelli generici" è stata assegnata la categoria più idonea.

Oltre alle informazioni geometriche e grafiche utilizzate per rappresentare i vari elementi del tunnel, sono state inserite le informazioni alfanumeriche. Per fare ciò sono stati creati dei parametri nelle famiglie e sono stati compilati utilizzando le schede tecniche del produttore, articoli di giornale, ecc..

I parametri in Revit si dividono in parametri *tipo* e parametri *istanza*. Un parametro *tipo* controlla tutti gli elementi (istanze) posizionati nell'area di disegno appartenenti ad un determinato tipo. I parametri *istanza* rappresentano, invece, l'ultimo livello della gerarchia e riguardano le specifiche proprietà di ogni singola istanza, ossia di ogni elemento inserito nel disegno considerato individualmente definendo la sua posa in opera.

I parametri sono stati raggruppati in due macrogruppi:

- caratteristiche;
- manutenzione.

Il primo gruppo comprende l'insieme dei parametri generali, identificativi e tecnici del singolo oggetto modellato; il secondo gruppo, invece, comprende i parametri legati alla manutenzione in generale e al programma e alla tipologia degli interventi. I parametri generali e identificativi sono stati creati utilizzando come riferimento le schede tecniche di alcuni produttori di elementi per gallerie o tunnel stradali. Per quanto riguarda invece i parametri per l'Asset management da parte dell'Ente Gestore sono stati compilati in parte con attributi presi da articoli di giornale (quali data di installazione segnaletica, data ultima manutenzione dell'impianto di illuminazione, ecc.) altri invece sono stati inventati. I parametri sono stati creati in diversi formati quali testo, immagine, data, booleano (SI/NO) e collegamento URL attraverso il quale richiamare la documentazione raccolta all'interno di una cartella esterna al progetto.

Si è scelto di creare un template comune per quanto riguarda i parametri generali di seguito riportato:

| CARATTERISTICHE                                     |   |          |
|---|---|----------|
| G<br>E<br>N<br>E<br>R<br>A<br>L<br>E                | <b>Parametri Generali (IfcAnagraficaBase):</b>              |          |
|   | produttore  | [testo]  |
|   | modello   | [testo]  |
|   | Codice apparecchio  | [numero] |
|   | Descrizione del Prodotto                                    | [testo]  |
|   | Riferimenti Produttore                                      | [testo]  |
|   | E-mail  | [testo]  |
| D<br>A<br>T<br>I                                    | <b>Parametri Identificativi (IfcIdentificativoOggetto):</b> |          |
|   | Codice libreria Stazione Appaltante                         | [testo]  |
|   | Codice WBS  | [testo]  |
|   | ID Elemento   | [testo]  |
|   | Uniclass  | [testo]  |
| A<br>L<br>T<br>E<br>R<br>N<br>A<br>T<br>I<br>V<br>E | <b>Parametri tecnici (IfcTecnico):</b>                      |          |
|   | Scheda Tecnica  | [URL]    |
|   | Certificazione  | [URL]    |
|   | Certificazioni Supplementari                                | [URL]    |
|   | Certificazione di Collaudo                                  | [URL]    |
|   | Uso e ciclo di vita   | [URL]    |
| Applicazioni  | [testo]   |          |

Tabella 8-2 Template utilizzato per la creazione dei parametri del cluster caratteristiche in Revit.

Di seguito vengono riportati alcuni elementi modellati in Revit: **new jersey, dispositivo di illuminazione e un segnale verticale.**

### 8.3.1 New Jersey

Per creare la famiglia New Jersey è stato scelto il template “modello generico metrico basato su superficie” e a partire da informazioni geometriche contenute nel catalogo del produttore scelto è stata modellata la geometria. Sono stati definiti, quindi, i parametri legati alla geometria dell’oggetto modellato, come ad esempio l’altezza e la larghezza della base del dispositivo di ritenuta (*Figura 8-21*) definendone il profilo. Per estrusione, impostando la lunghezza, ne è stata poi definita la geometria del solido.

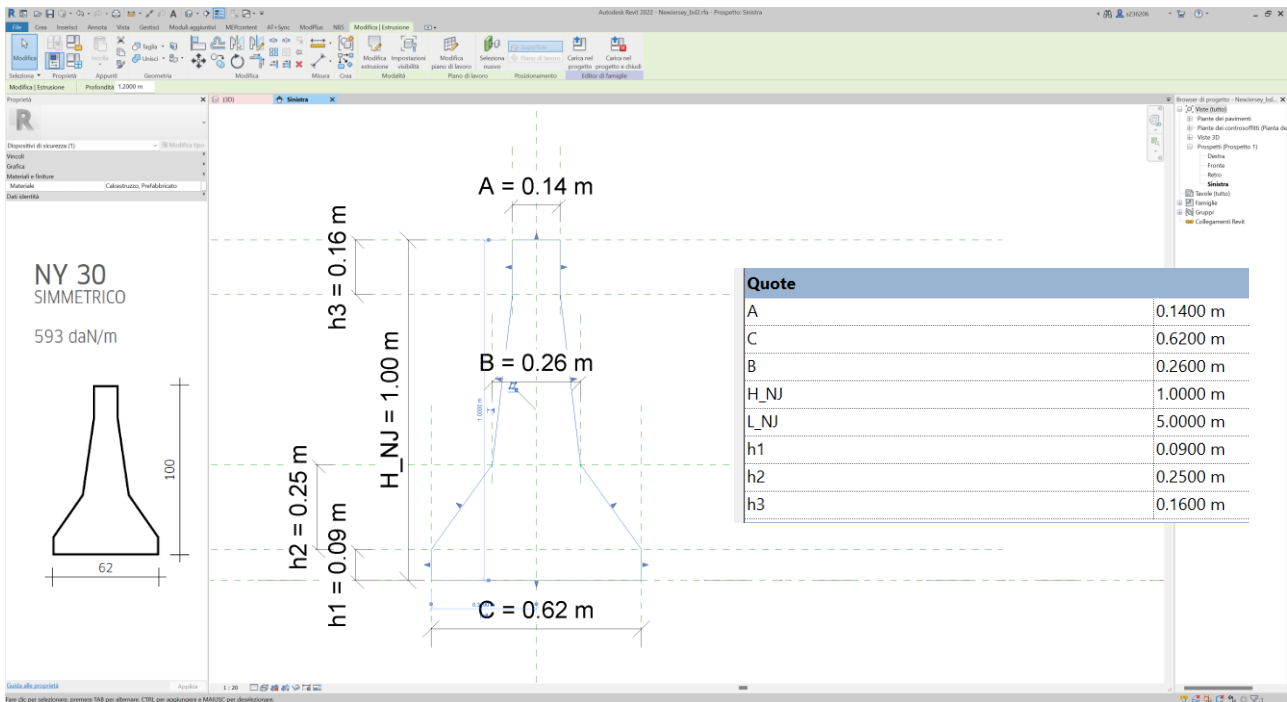


Figura 8-21 Definizione dei parametri geometrici per ogni elemento del tunnel partendo da cataloghi e disegni tecnici del produttore.

In seguito a partire dal catalogo del produttore sono stati creati dei parametri di istanza e sono stati compilati con i vari attributi. Durante la fase di creazione dei parametri, oltre a scegliere come tipo di parametro il parametro istanza (Figura 8-22), è stata scelta la disciplina (comune, elettrico, infrastruttura, ecc.), la tipologia di parametro (testo, intero, URL, SI/NO, ecc.) e il raggruppamento (generale, dati, altro, proprietà modello, quote, testo, ecc.).

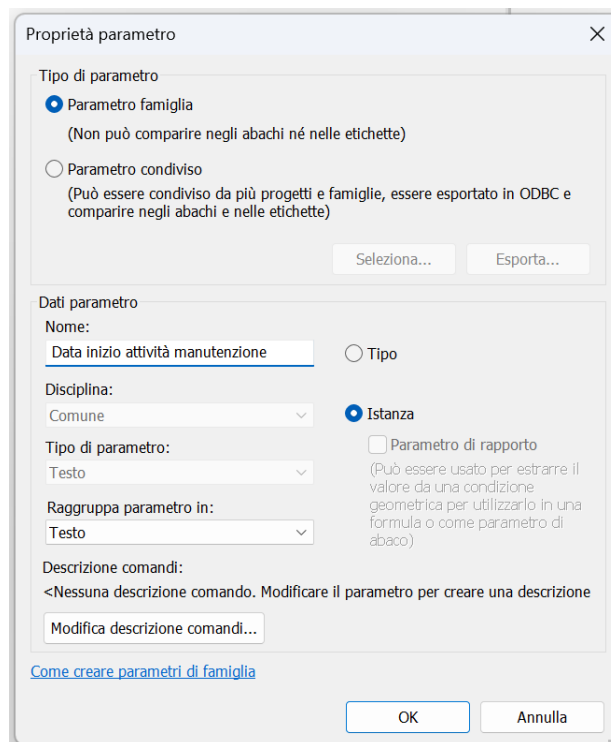


Figura 8-22 Creazione del parametro istanza in Revit.

Di seguito viene riportato la finestra di dialogo “Tipi di famiglia” all’interno della quale sono riportati i parametri che sono stati creati relativi alla famiglia dell’elemento New Jersey.

Tipi di famiglia

Nome del tipo: NewJersey

Parametri di ricerca

| Parametro  | Valore  |
|--|---|
| <b>Testo</b>   |   |
| Data inizio attività manutenzione (default)            | 04/12/2023  |
| Data fine attività manutenzione (default)              | 07/12/2023  |
| ID Cronoprogramma (default)                            | 00_024  |
| Stato dell'oggetto (default)                           | Intervento programmato  |
| Tipo attività (default)                                | Manutenzione progrmmata   |
| Frequenza (default)                                    | Quando richiesto  |
| Manodopera necessaria (default)                        | Tecnico specializzato   |
| <b>Quote</b>   |   |
| <b>Proprietà modello</b>                               |   |
| Data di installazione (default)                        | 22/03/1996  |
| Data ultima manutenzione (default)                     | 23/08/1999  |
| Scheda di manutenzione (default)                       | "D:\Antonini M\URL\URL_05.pdf"  |
| Programmazione temporale manutenzioni (default)        | "D:\Antonini M\URL\URL_06.pdf"  |
| Tipologia di manutenzione ordinaria prevista (l manute | Ripristino  |
| Storico manutenzioni/Registrazione Dati Manutenzion    | "D:\Antonini M\URL\URL_07.pdf"  |
| Livello di criticità (default)                         | Media   |
| Esecutore (default)                                    | Impresa Bianchi Spa   |
| Nome manutentore (default)                             | Mario Bianchi   |
| Riferimenti manutentore (default)                      | 323333333   |
| Note (default)   | sostituzione  |
| Foto   | foto_13.jpeg  |
| Data ultima modifica (default)                         | 30/11/2023  |
| <b>Generale</b>  |   |
| produttore (default)                                   | Tecnotre Srl  |
| modello (default)                                      | NewJersey Simmetrico NY30   |
| codice (default)                                       | NY30 Simmetrico   |
| Descrizione del Prodotto (default)                     | Questo prodotto è ideale per la realizzazione di divisorie, spartitraffico e delimitazioni perimetrali; |
| Riferimenti Produttore (default)                       | https://www.tecno-tre.it/   |
| E-mail (default)                                       | tecnotre@gigapec.it   |
| <b>Dati</b>  |   |
| Codice libreria Stazione Appaltante (default)          | NJ_01   |
| Codice WBS (default)                                   | P01-GA-01-SIC-LF-01-A   |
| ID Elemento (default)                                  | SL-NJ-01  |
| Uniclass (default)                                     | UNI EN 12839:ur "PRODOTTI PREFABBRICATI IN CALCESTRUZZO: ELEMENTI PER RECINZIONI" NI                    |
| <b>Altro</b>   |   |
| Scheda Tecnica (default)                               | "D:\Antonini M\Antonini M\Progetti\FAMIGLIE\new jersey\Catalogo_Tecnotre_NewJersey_2022                 |
| Certificazione (default)                               | "D:\Antonini M\URL\URL_01.pdf"  |
| Certificazioni Supplementari (default)                 | "D:\Antonini M\URL\URL_02.pdf"  |
| Certificazione di Collaudo (default)                   | "D:\Antonini M\URL\URL_03.pdf"  |
| Uso e ciclo di vita (default)                          | "D:\Antonini M\URL\URL_04.pdf"  |
| Destinazione d'uso (default)                           | Realizzazione di spartitraffico   |
| Caratteristiche impasto (default)                      | Conglomerato cementizio avente resistenza caratteristica media a rottura pari a 600 Kg/cm2              |
| Peso (default)   | 3680 Kg/CAD   |
| Massa volumica (default)                               | 2400 Kg/m3  |
| Resistenza al gelo (default)                           | Non gelivo  |
| Materiale 1 (default)                                  | Cemento armato vibrato  |
| Materiale 2 (default)                                  | Ferro   |

Gestisci tabelle di ricerca

Come gestire i tipi di famiglia

OK Annulla Applica

Figura 8-23 Esempio di contenuto informativo in Revit per l'elemento "New Jersey".

In tabella sono riportati i vari parametri che sono stati creati e gli attributi.

| CARATTERISTICHE   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| G<br>E<br>N<br>E<br>R<br>A<br>L<br>E  | <b>Parametri Generali</b> (IfcAnagraficaBase):                |   |   |
|   | produttore  | [testo]   | Tecnotre Srl  |
|   | modello   | [testo]   | NewJersey Simmetrico NY30   |
|   | codice  | [numero]  | NY30 Simmetrico   |
|   | Descrizione del Prodotto                                      | [testo]   | Questo prodotto è ideale per la realizzazione di divisorie, spartitraffico e delimitazioni perimetrali; lo stampo prevede apposite asole al piede che rendono il blocco semplice da movimentare con ogni genere di muletto, unitamente agli incastrati laterali "maschio-femmina" che rendono la posa più semplice e conferiscono alla barriera finita maggiore robustezza. L620 cm - 3680 Kg calcestruzzo classificato come "AD ALTE PRESTAZIONI E ALTA RESISTENZA" (Linee Guida sul Calcestruzzo Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2003). La tecnica originale di produzione, che consiste in una miscela umida a sfonatura immediata, consente di ottenere a maturazione una RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE Rck maggiore di 600 kg/cmq (60MPa) e CLASSI DI ESPOSIZIONE XF4-XS3 (UNI 206-1:2006). |
|   | Riferimenti Produttore (default)                              | [testo]   | https://www.tecno-tre.it/   |
|   | E-mail (default)  | [testo]   | tecnotre@gigapec.it   |
| D<br>A<br>T<br>I  | <b>Parametri Identificativi</b> (IfcIdentificativoOggetto):   |   |   |
|   | Codice libreria Stazione Appaltante                           | [testo]   | NJ_01   |
|   | Codice WBS  | [testo]   | P01-GA-01-CAN-LF-01-A   |
|   | ID Elemento   | [testo]   | SL-NJ-01  |
| Uniclass  | [testo]   | UNI EN 12839:ur "PRODOTTI PREFABBRICATI IN CALCESTRUZZO: ELEMENTI PER RECINZIONI" NI EN 1340:ur "CORDOLI IN CALCESTRUZZO – REQUISITI E METODI DI PROVA" |   |
| A<br>L<br>T<br>R<br>O   | <b>Parametri tecnici</b> (IfcTecnico):                        |   |   |
|   | Scheda Tecnica  | [URL]   | "D:\Antonini M\Antonini M\Progetti\FAMIGLIE\new jersey\Catalogo_Tecnotre_NewJersey_2022.pdf"  |
|   | Certificazione  | [URL]   | D:\Antonini M\URL\URL_01.pdf  |
|   | Certificazioni Supplementari                                  | [URL]   | D:\Antonini M\URL\URL_02.pdf  |
|   | Certificazione di Collaudo                                    | [URL]   | D:\Antonini M\URL\URL_03.pdf  |
|   | Uso e ciclo di vita   | [URL]   | D:\Antonini M\URL\URL_04.pdf  |
|   | Destinazione d'uso (default)                                  | [testo]   | Realizzazione di spartitraffico   |
|   | Caratteristiche impasto (default)                             | [testo]   | Conglomerato cementizio avente resistenza caratteristica media a rottura pari a 600 Kg/cm2  |
|   | Peso (default)  | [testo]   | 3680 Kg/CAD   |
|   | Massa volumica (default)                                      | [testo]   | 2400 Kg/m3  |
|   | Resistenza al gelo (default)                                  | [testo]   | Non gelivo  |
|   | Materiale 1   | [testo]   | Cemento armato vibrato  |
| Materiale 2   | [testo]   | Ferro   |   |
| MANUTENZIONE  |   |   |   |
| P<br>R<br>O<br>P<br>R<br>I<br>E<br>T<br>A<br>'<br>M<br>O<br>D<br>E<br>L<br>L<br>O | <b>Parametri Generali Manutenzione</b> (IfcAnagraficaBaseM):  |   |   |
|   | Data di installazione   | [testo] (dd/mm/yyyy)  | 22/03/1996  |
|   | Data ultima manutenzione                                      | [testo] (dd/mm/yyyy)  | 23/08/1999  |
|   | Scheda di manutenzione  | [URL]   | "D:\Antonini M\URL\URL_05.pdf"  |
|   | Programmazione temporale manutenzioni                         | [URL]   | D:\Antonini M\URL\URL_06.pdf  |
|   | Tipologia di manutenzione ordinaria prevista (I manutenzione) | [testo]   | Ripristino  |
|   | Storico manutenzioni/Registrazione Dati Manutenzione          | [URL]   | "D:\Antonini M\URL\URL_07.pdf"  |
|   | Livello di criticità  | [testo]   | Media   |
|   | Esecutore   | [testo]   | Impresa Rossi Spa   |
|   | Nome manutentore  | [testo]   | Mario Rossi   |
|   | Riferimenti manutentore                                       | [testo]   | 323333333   |
|   | Note  | [testo]   | sostituzione  |
|   | Foto  | [immagine]  | foto_13.jpeg  |
|   | Data ultima modifica  | [testo]   | 30/11/2023  |
|   | T<br>E<br>S<br>O  | <b>Parametri 4D Manutenzione</b> (IfcInformazioni_4D_M):  |   |
| Data inizio attività manutenzione   |   | [testo] (dd/mm/yyyy)  | 04/12/2023  |
| Data fine attività manutenzione   |   | [testo] (dd/mm/yyyy)  | 07/12/2023  |
| ID Cronoprogramma   |   | [testo]   | 00_024  |
| Stato dell'oggetto  |   | [testo]   | Intervento programmato  |
| <b>Parametri Attività Manutenzione</b> (IfcInformazioniAttività_M):               |   |   |   |
| Tipo attività   |   | [testo]   | Manutenzione programmata  |
| Frequenza   | [testo]   | Quando richiesto  |   |
| Manodopera necessaria   | [testo]   | Tecnico specializzato   |   |

Tabella 8-3 Parametri, tipologia e attributi per l'elemento New Jersey.

Oltre a creare parametri di testo, numero e URL Autodesk Revit consente di inserire delle foto sotto forma di parametri tipo e non istanza per inserire dei collegamenti con delle immagini contenute in un database esterno.

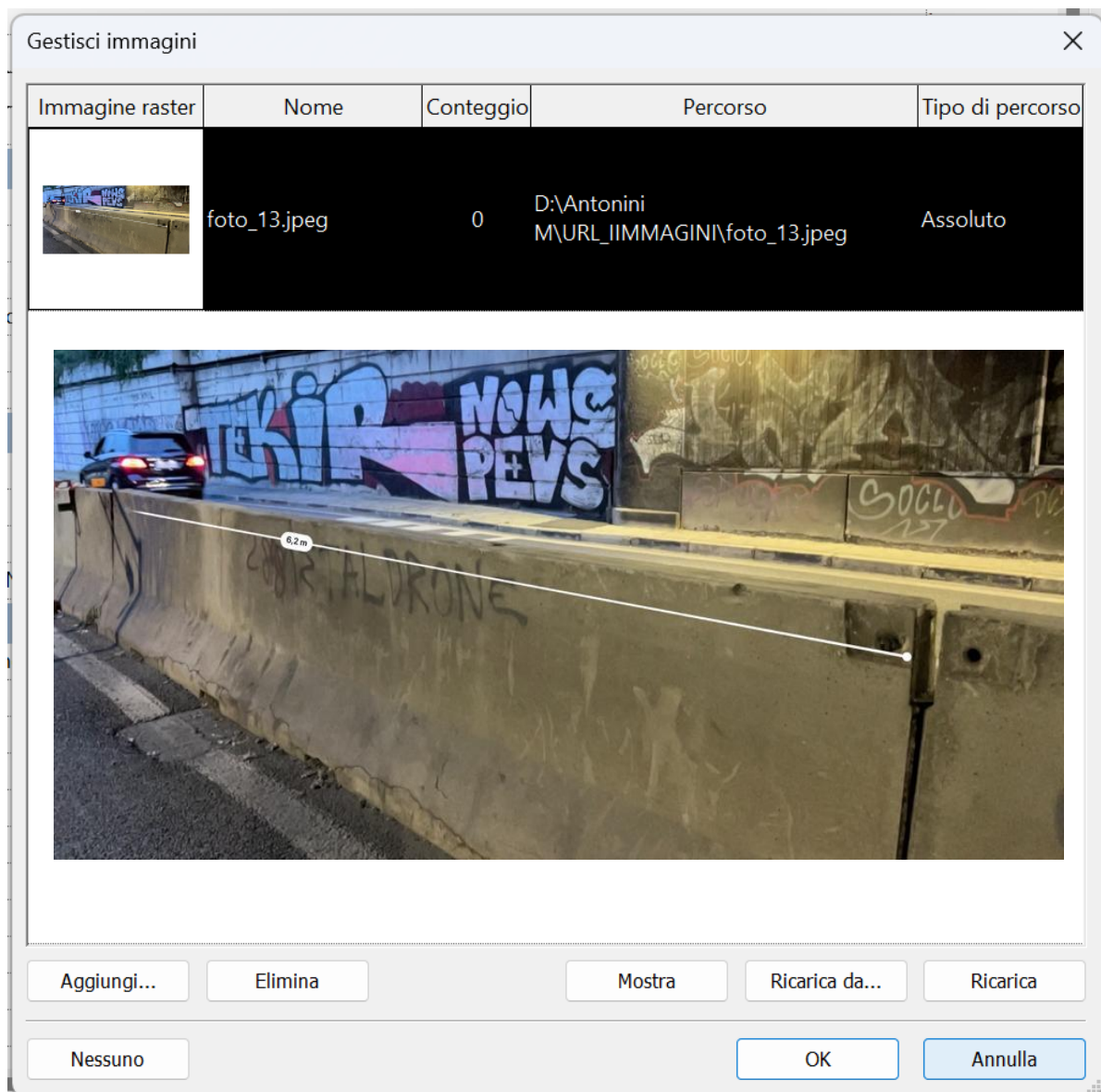


Figura 8-24 Esempio di collegamento immagine all'interno del contenuto informativo in Revit (foto\_13.jpg) del New Jersey.

### 8.3.2 Dispositivi di illuminazione

Per i dispositivi di illuminazione in modo analogo sono state estratte dal sito internet del produttore (AEC Illuminazione S.r.l.) per entrambe le tipologie di dispositivi di illuminazione (Lampada Galileo 1 e Lampada Galileo 2 EB Tunnel) presenti all'interno del sottopasso Lingotto sia la scheda tecnica sia il file IES (*Iesna*) contenente le informazioni fotometriche. Tali dati, in genere, vengono messi a disposizione di tutti dal produttore per consentire ai professionisti di condurre le adeguate verifiche illuminotecniche e a redigere la documentazione necessaria al progetto [15].

Sono stati modellati pertanto due tipologie di lampade tramite due famiglie diverse. Il template di famiglia scelto per entrambe le tipologie è "Dispositivo di illuminazione metrico"; tale template consente di utilizzare dei parametri predefiniti per i dispositivi di illuminazione, oltre a crearne altri nuovi.

I dispositivi di illuminazione sono caratterizzati da una geometria, raffigurante il corpo illuminante così come concepito dal designer dell'azienda produttrice, e dalle caratteristiche elettriche quali assorbimento, potenza, tipo e temperatura della lampada. Ogni parametro è stato raggruppato per



disciplina (gruppo ottico, elettrico, quote, fotometrica, proprietà modello ovvero dati per la manutenzione, dati generali e identificativi ecc.) e specificata la tipologia (testo, URL, immagine, ecc.). Di seguito vengono riportati i parametri specifici relativi al gruppo ottico, elettrico e fotometrica creati (Figura 8-25).

| Gruppo Ottico                                       |  |   |  |
|---|--|---|--|
| G<br>R<br>U<br>P<br>P<br>O                          | Vita gruppo ottico (Tq=25°C, 700mA) (default)                  | [testo]   | >100.000hr L90B10, >100.000hr L90, TM-21   |
|   | Ottica (default)   | [testo]   | ASC-7W; Ottica asimmetrica ad emissione regolabile per illuminazione di rinforzo.                |
|   | Temp. di esercizio (default)                                   | [testo]   | -40°C / +50°C (525mA)   -40°C / +35°C (700mA)  |
|   | Temp. di stoccaggio (default)                                  | [testo]   | -40°C / +80°C  |
|   | Norme di riferimento (default)                                 | [testo]   | EN 60598-1, EN 60598-2-3, EN 60598-2-5, EN 62471, EN 55015, EN 61547, EN 61000-3-2, EN 61000-3-3 |
|   | Staffa (default)   | [testo]   | staffa regolabile per canale 100x75mm fino a 300x75mm  |
|   | Peso escluso staffa (default)                                  | [testo]   | 19 kg  |
|   | Peso staffa (default)  | [testo]   | 1,8 kg   |
|   | Superficie laterale (default)                                  | [testo]   | 0.10 m <sup>2</sup>  |
|   | Superficie pianta (default)                                    | [testo]   | 0.20 m <sup>2</sup>  |
| Elettrico   |  |   |  |
| E<br>L<br>E<br>T<br>T<br>R<br>I<br>C<br>O           | Corrente LED (default)   | [testo]   | 0.70 A   |
|   | Frequenza (default)  | [testo]   | 50.00 Hz   |
|   | Alimentazione (default)  | [testo]   | 230.00 V   |
|   | Potenza apparecchio (default)                                  | [testo]   | 300.00 W   |
|   | Potenza apparente apparecchio (default)                        | [numero] Potenza apparecchio / Fattore di potenza | 333.33 VA  |
|   | Fattore di potenza (default)                                   | [testo]   | 0.9  |
|   | Flusso nominale LED (default)                                  | [testo]   | 44820 (Tj=85°C, 4000K, lm)   |
|   | Potenza nominale LED (default)                                 | [testo]   | 282 (Tj=85°C, W)   |
|   | Classe di isolamento (default)                                 | [testo]   | II, I  |
|   | Grado di protezione (default)                                  | [testo]   | IP66   IK08 totale   |
| efficienza sorgente LED (default)                   | [testo]  | 168 lm/W @ 525mA, Tj=85°C, 5700K                  |  |
| Fotometrica   |  |   |  |
| F<br>O<br>T<br>O<br>M<br>E<br>T<br>R<br>I<br>C<br>A | Angolo inclinazione  | [numero]  | 60.00°   |
|   | Colore iniziale  | [numero]  | 4000 K   |
|   | Fattore di perdita di illuminazione                            | [numero]  | 1  |
|   | File diagramma fotometrico                                     | [URL]   | Galileo 2 0F6 ASC-7W 4.7-6M.IES  |
|   | Filtro dei colori  | [Multi Choice]                                    | Bianco   |
|   | Intensità iniziale   | [numero]  | 34220 lm   |
|   | Variazione temperatura colore lampada con luminosità attenuata | [Multi Choice]                                    | Nessuno  |
|   | efficienza apparecchio (default)                               | [numero] flusso luminoso / Potenza apparecchio    | 114.07 lm/W  |
|   | flusso luminoso (default)                                      | [numero]  | 34220.00 lm  |
|   | Temperatura di colore (default)                                | [numero]  | 4000.00 K  |
| Efficienza sorgente LED (default)                   | [numero]   | 168.00 lm/W                                       |  |

Figura 8-25 Parametri tecnici inseriti nella famiglia "lampada Galileo 2 EB Tunnel".

In particolare, il parametro vita gruppo ottico, risulta essere un parametro tecnico fondamentale per il gestore, poiché descrive la vita di una lampada o di un gruppo di lampade. Può essere definita nei seguenti modi [22]:

- vita tecnica individuale: numero delle ore di accensione dopo le quali una lampada va fuori servizio o non risponde più a determinate specifiche;
- vita economica: numero di ore dopo il quale il livello di illuminamento della lampada decade di oltre il 30%;
- vita media: numero di ore dopo il quale il 50% di un lotto significativo di lampade va fuori servizio.

La durata di una lampada dipende da diversi fattori quali scostamento dal valore nominale della tensione di alimentazione, i cicli di accensione, la temperatura dell'ambiente, la posizione di funzionamento o eventuali urti e vibrazioni o shock termici [22].

Altri parametri creati sono:

- intensità luminosa, che rappresenta il flusso luminoso emesso entro l'angolo solido unitario. È una grandezza utilizzata per caratterizzare le sorgenti luminose attraverso le curve fotometriche e che determina l'assorbimento elettrico dell'apparecchio;
- flusso luminoso, ovvero il prodotto della potenza radiante luminosa per la visibilità. L'unità di misura è il lumen. Il flusso è la grandezza fotometrica più significativa per caratterizzare una lampada, dato che esprime la potenza luminosa ai fini dell'illuminazione.
- efficienza apparecchio, ovvero il rapporto tra il flusso luminoso emesso dalla sorgente e la potenza elettrica assorbita (lumen/Watt)
- temperatura di colore della lampada: il colore di una luce può essere stabilito associandolo al colore della radiazione emessa dal corpo nero. Questa varia di colore al variare della temperatura di emissione, seguendo una curva caratteristica che può essere riportata sul diagramma normalizzato CIE dei colori;
- tipo della lampada (led, incandescenza, ecc.)
- immagini delle dimensioni della lampada e dell'ottica estratte dalla scheda tecnica.

Inoltre, sono stati creati parametri di testo che descrivono i materiali dei vari elementi del dispositivo di illuminazione (Figura 8-26).

| Materiali                                 |                          |         |  |
|---|--------------------------|---------|--|
| M<br>A<br>T<br>E<br>R<br>I<br>A<br>L<br>I | Attacco (default)        | [testo] | Acciaio inox AISI 304 (AISI 316L optional) con isolatori plastici.   |
|   | Dissipatore (default)    | [testo] | Alluminio pressofuso UNI EN1706 a basso tenore di rame.  |
|   | Corpo (default)          | [testo] | Alluminio pressofuso UNI EN1706. Verniciato a polveri.   |
|   | Vano cablaggio (default) | [testo] | Alluminio estruso anodizzato.  |
|   | Gruppo ottico (default)  | [testo] | Alluminio 99.85% con finitura superficiale realizzata con deposizione sotto vuoto 99.95%. Alluminio classe A+ (DIN EN 16268) |
|   | Schermo (default)        | [testo] | Vetro piano temperato sp. 5mm elevata trasparenza.   |
|   | Pressacavo (default)     | [testo] | Metallico, M20x1,5 – IP68  |
|   | Guarnizione (default)    | [testo] | Poliuretano  |
|   | Colore (default)         | [testo] | Grafite - Cod. 01  |

Figura 8-26 Parametri relativi ai materiali della lampada Galileo 2 EB Tunnel inseriti nella famiglia.

Pertanto, a partire dai dati contenuti nella scheda tecnica relativa alla lampada Galileo 2 Tunnel EB sono stati creati dei parametri istanza e sono stati compilati gli attributi nella finestra *Tipi di famiglia* (Figura 8-27).

In Figura 8-27 è riportato un esempio di creazione di un parametro come rapporto di due grandezze; in particolare il parametro *efficienza apparecchio*.

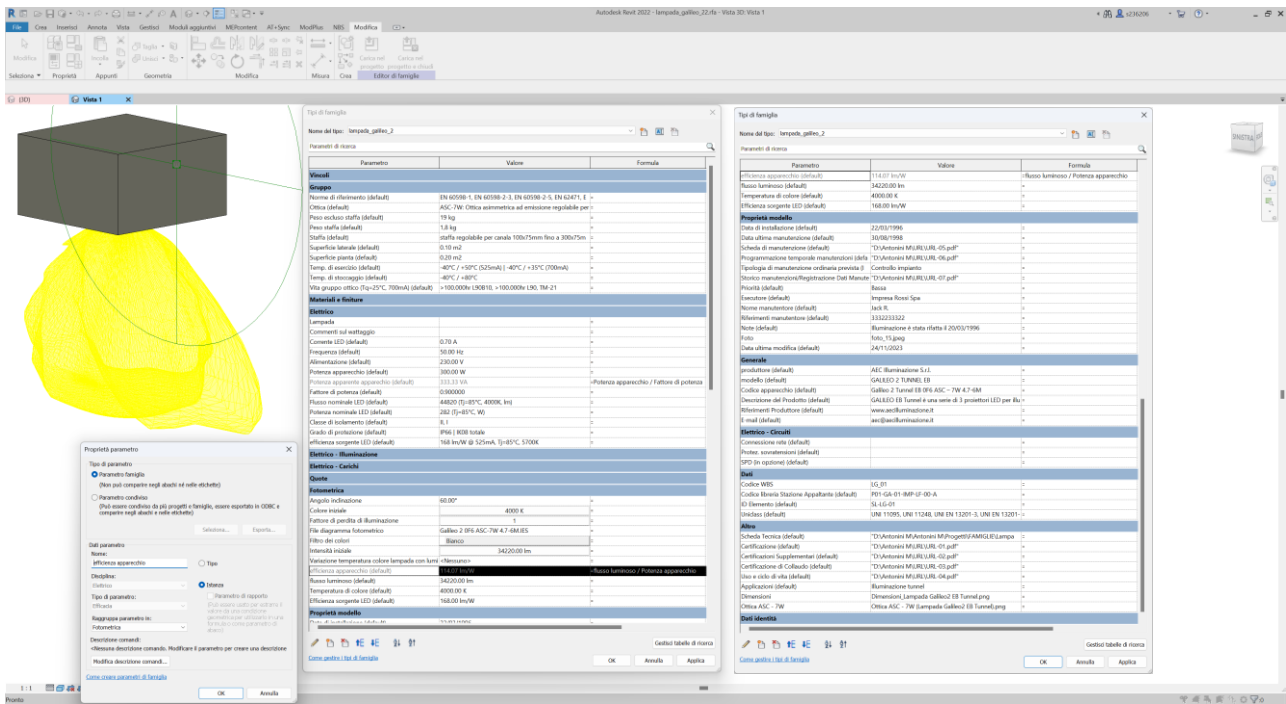


Figura 8-27 Modellazione della lampada a sinistra, al centro esempio di creazione di un parametro istanza, efficienza apparecchio come rapporto tra due grandezze legato alla disciplina elettrica e raggruppato in fotometrica.

In aggiunta a queste informazioni, è stato caricato il file di estensione. IES nel campo valore del parametro *File diagramma fotometrico* (Figura 8-28) che rappresenta la curva fotometrica generata dal flusso luminoso dell'apparecchio: ogni corpo illuminante ne ha una che si diversifica per tipo, potenza, temperatura di colore. Tali dati vengono raccolti ed elaborati all'interno di una camera completamente buia e nera e trasformati in una curva che li rappresenta.

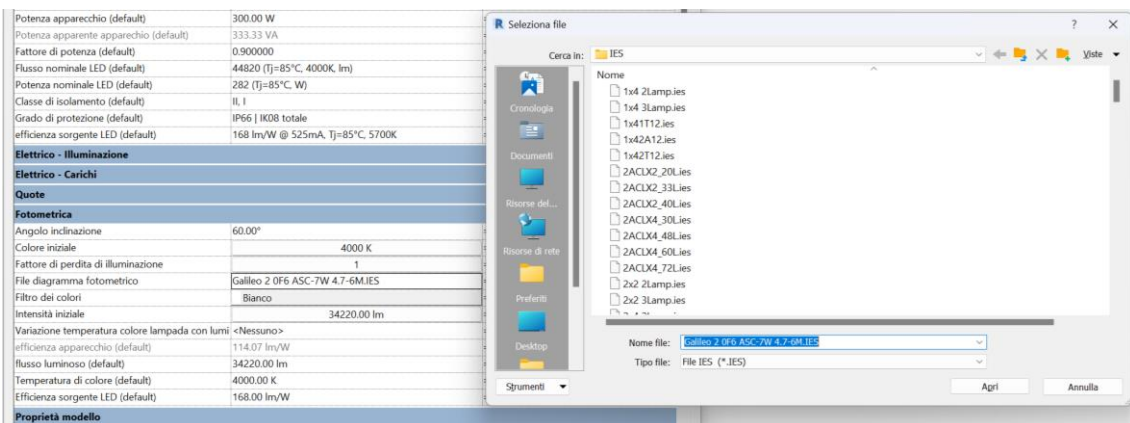


Figura 8-28 Caricamento del file IES nel campo valore del parametro file diagramma fotometrico.

È stato poi inserito il connettore elettrico che rappresenta il collegamento di potenza per l'elemento al circuito elettrico. In vista 3D della famiglia di lampada modellata viene evidenziata la curva fotometrica con una sorta di sfera di colore giallo; selezionando la sorgente di illuminazione è stato possibile definire la sorgente di illuminazione impostando sia la forma dell'emettitore sia la proprietà legata alla distribuzione della luce (sfera, semisfera, riflettore, e diagramma fotometrico). Il solido fotometrico consente di conoscere la distribuzione spaziale del flusso. Per caricare la curva fotometrica è stato necessario impostare l'opzione della distribuzione della luce sul Diagramma fotometrico (Figura 8-29).

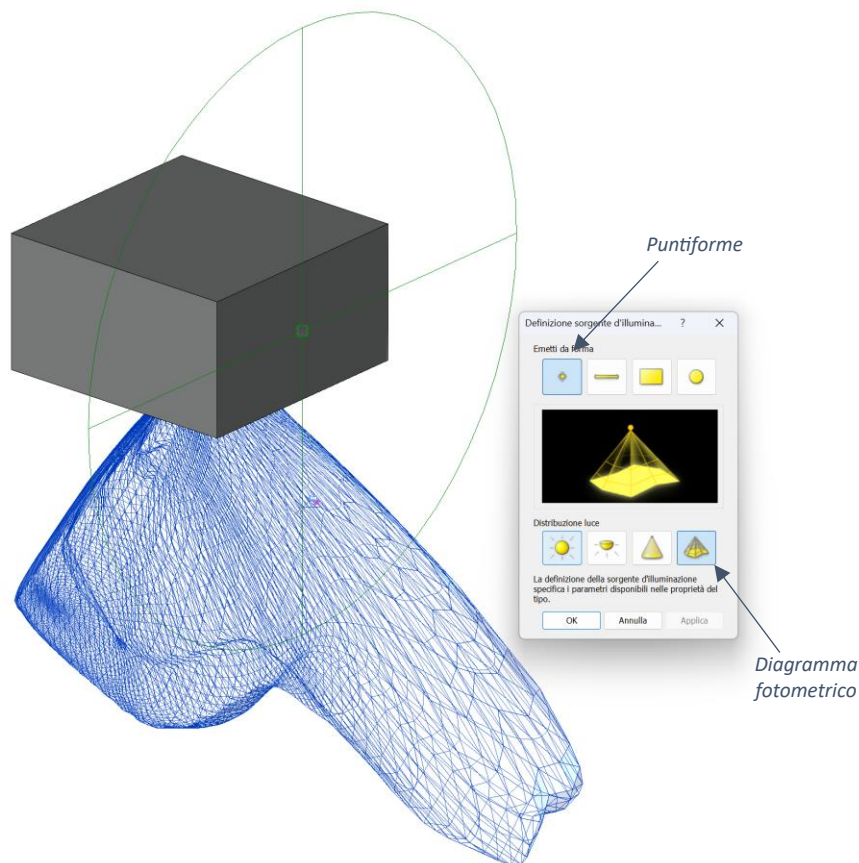


Figura 8-29 Definizione della sorgente di illuminazione forma e distribuzione luce.

Infine, sono stati inseriti i parametri generali, identificativi e tecnici riportati in Figura 8-30 e i parametri legati alla gestione e manutenzione dei dispositivi Figura 8-31.

| CARATTERISTICHE                      |   |   |   |
|--------------------------------------|---|---|---|
| G<br>E<br>N<br>E<br>R<br>A<br>L<br>E | <b>Parametri Generali (IfcAnagraficaBase):</b>              |   |   |
|                                      | produttore  | [testo]                                   | AEC Illuminazione S.r.l.  |
|                                      | modello   | [testo]                                   | GALILEO 2 TUNNEL EB   |
|                                      | Codice apparecchio  | [numero]                                  | Galileo 2 Tunnel EB OF6 ASC – 7W 4.7-6M   |
|                                      | Descrizione del Prodotto                                    | [testo]                                   | GALILEO EB Tunnel è una serie di 3 proiettori LED per illuminazione di tunnel e sottopassaggi. Riduci i costi energetici e ottimizza la manutenzione con risultati immediati in termini di sicurezza stradale e comfort visivo. |
|                                      | Riferimenti Produttore                                      | [testo]                                   | <a href="http://www.aecilluminazione.it">www.aecilluminazione.it</a>  |
|                                      | E-mail  | [testo]                                   | <a href="mailto:aec@aecilluminazione.it">aec@aecilluminazione.it</a>  |
| D<br>A<br>T<br>I                     | <b>Parametri Identificativi (IfcIdentificativoOggetto):</b> |   |   |
|                                      | Codice libreria Stazione Appaltante                         | [testo]                                   | LG_01   |
|                                      | Codice WBS  | [testo]                                   | P01-GA-01-IMP-LF-00-A   |
|                                      | ID Elemento   | [testo]                                   | SL-LG-01  |
|                                      | Uniclass  | [testo]                                   | UNI 11095 - UNI 11248 - UNI EN 13201-3 - UNI EN 13201-2 - CEI 64-20   |
| A<br>L<br>T<br>R<br>O                | <b>Parametri tecnici (IfcTecnico):</b>                      |   |   |
|                                      | Scheda Tecnica  | [URL]                                     | D:\Antonini M\Antonini M\Progetti\FAMIGLIE\Lampada illuminazione\AEC Illuminazione\Scheda-Tecnica-Galileo-2EB-TUNNEL.pdf  |
|                                      | Certificazione  | [URL]                                     | D:\Antonini M\URL\URL-01.pdf  |
|                                      | Certificazioni Supplementari                                | [URL]                                     | D:\Antonini M\URL\URL-02.pdf  |
|                                      | Certificazione di Collaudo                                  | [URL]                                     | D:\Antonini M\URL\URL-03.pdf  |
|                                      | Uso e ciclo di vita   | [URL]                                     | D:\Antonini M\URL\URL-04.pdf  |
|                                      | Applicazioni  | [testo]                                   | Illuminazione tunnel  |
| Dimensioni                           | [immagine]  | Dimensioni_Lampada Galileo2 EB Tunnel.png |   |
|                                      | Ottica ASC - 7W   | [immagine]                                | Ottica ASC - 7W (Lampada Galileo2 EB Tunnel).png  |

Figura 8-30 Parametri generali, identificativi e tecnici per il dispositivo di illuminazione

| MANUTENZIONE |   |                      |   |
|--------------|---|----------------------|---|
| <b>P</b>     | <b>Parametri Generali Manutenzione</b> (IfcAnagraficaBaseM):        |                      |   |
| <b>R</b>     | Data di installazione   | [testo] (dd/mm/yyyy) | 22/03/1996                                  |
| <b>O</b>     | Data ultima manutenzione  | [testo] (dd/mm/yyyy) | 23/08/1999                                  |
| <b>P</b>     | Scheda di manutenzione  | [URL]                | "D:\Antonini M\URL\URL_05.pdf"              |
| <b>R</b>     | Programmazione temporale manutenzioni                               | [URL]                | D:\Antonini M\URL\URL_06.pdf                |
| <b>I</b>     | Tipologia di manutenzione ordinaria prevista (I1 manutenzione)      | [testo]              | Controllo impianto                          |
| <b>E</b>     | Storico manutenzioni/Registrazione Dati Manutenzione                | [URL]                | "D:\Antonini M\URL\URL_07.pdf"              |
| <b>T</b>     | Priorità (default)  | [testo]              | Bassa                                       |
| <b>A</b>     | Esecutore   | [testo]              | Impresa Rossi Spa                           |
| <b>'</b>     | Nome manutentore  | [testo]              | Jack R.                                     |
| <b>M</b>     | Riferimenti manutentore   | [testo]              | 333233322                                   |
| <b>O</b>     | Note  | [testo]              | illuminazione è stata rifatta il 20/03/1996 |
| <b>D</b>     | Foto  | [immagine]           | foto_15.jpeg                                |
| <b>E</b>     | Data ultima modifica  | [testo]              | 24/11/2023                                  |
| <b>L</b>     |   |                      |   |
| <b>O</b>     |   |                      |   |
|              | <b>Parametri 4D Manutenzione</b> (IfcInformazioni_4D_M):            |                      |   |
|              | Data inizio attività manutenzione                                   | [testo] (dd/mm/yyyy) | 04/12/2023                                  |
|              | Data fine attività manutenzione                                     | [testo] (dd/mm/yyyy) | 07/12/2023                                  |
| <b>T</b>     | ID Cronoprogramma   | [testo]              | 00_024                                      |
| <b>E</b>     | Stato dell'oggetto  | [testo]              | Intervento programmato                      |
| <b>S</b>     |   |                      |   |
| <b>T</b>     | <b>Parametri Attività Manutenzione</b> (IfcInformazioniAttività_M): |                      |   |
| <b>O</b>     | Tipo attività   | [testo]              | Manutenzione programmata                    |
|              | Frequenza   | [testo]              | Quando richiesto                            |
|              | Manodopera necessaria   | [testo]              | Tecnico specializzato                       |

Figura 8-31 Parametri legati alla gestione e manutenzione del dispositivo di illuminazione.

Conclusa la definizione del dispositivo di illuminazione è stata caricata la famiglia nel progetto e posizionata correttamente con l'ausilio della nuvola di punti e i piani di sezione longitudinali creati. Inoltre, tramite la finestra di dialogo Proprietà è stato possibile in Revit visualizzare e modificare i parametri che definiscono le proprietà di ogni istanza (Figura 8-32). Ciò è stato utilizzato per variare l'attributo legato al parametro priorità (di intervento) di alcuni dispositivi (istanze) da bassa a alta per poter filtrare in VR. Applicando il filtro è possibile quindi visualizzare i componenti alla quale è stato assegnato una certa priorità di intervento (alta nell'esempio). Ciò permette di sapere su quali elementi è necessario effettuare le operazioni di manutenzione.

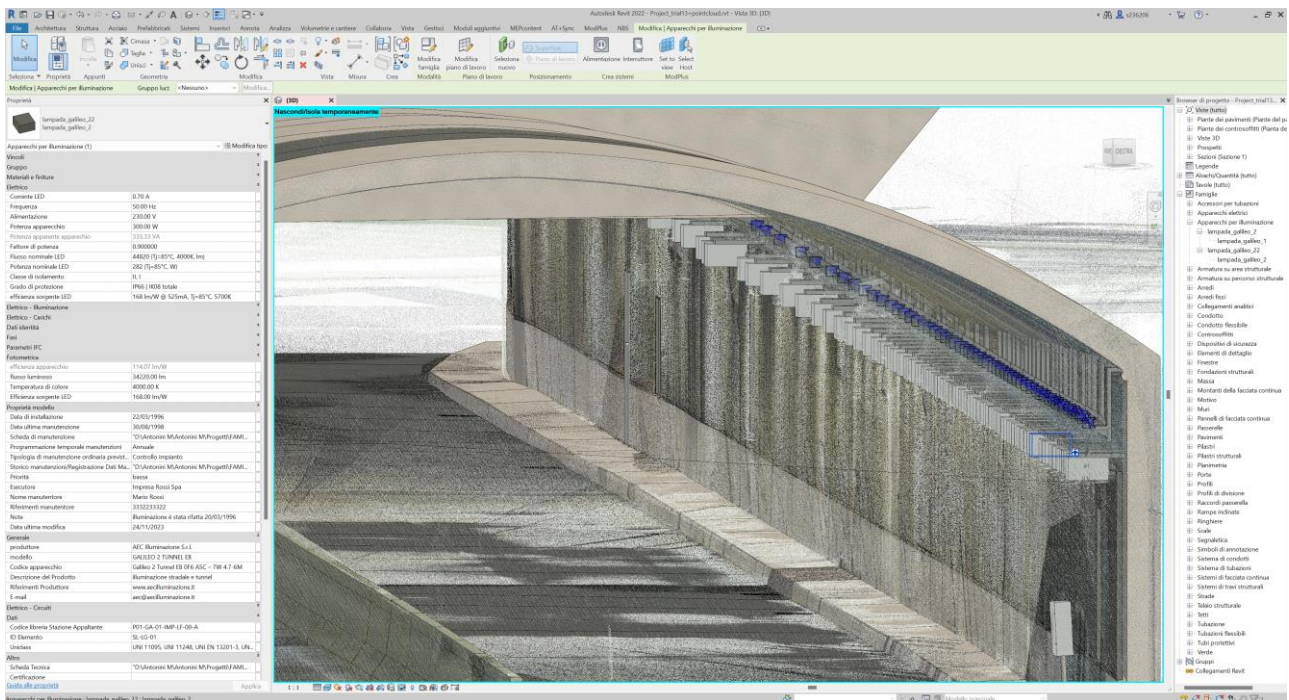


Figura 8-32 Creazione e compilazione dei parametri per ogni elemento del sottopasso generali e relativi alla manutenzione (inseriti nella scheda "Proprietà modello" non essendo presente in Revit 2022 una specifica).

### 8.3.3 Segnaletica Verticale

In modo analogo è stata modellata la segnaletica verticale presente nel tunnel; in particolare è stata definita la geometria, i materiali, l'aspetto e il contenuto informativo.

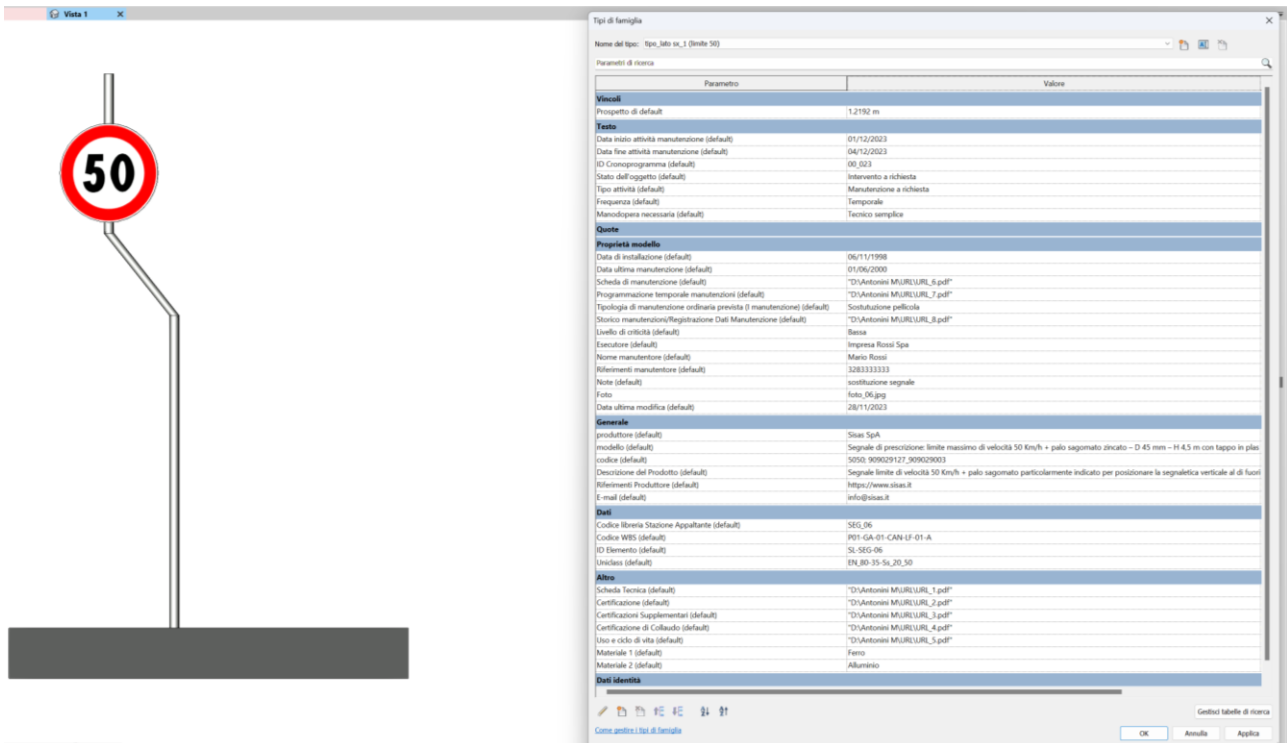


Figura 8-33 Esempio di modellazione di un segnale verticale (limite di velocità 50 km/h) presente all'interno del tunnel, creazione e compilazione dei parametri.

Di seguito viene riportato un esempio di parametri scelti per la segnaletica stradale (Figura 8-34).

| <b>CARATTERISTICHE</b>   |   |                       |   |
|--|---|-----------------------|---|
| <b>G<br/>E<br/>N<br/>E<br/>R<br/>A<br/>L<br/>E</b>   | <b>Parametri Generali (IfcAnagraficaBase):</b>                      |                       |   |
|  | produttore  | [testo]               | Sisas SpA   |
|  | modello   | [testo]               | <b>Segnale di prescrizione: limite massimo di velocità 30 Km/h + Supporto per New Jersey Innesto a baionetta per palo Ø 60 mm</b> |
|  | codice  | [numero]              | 5030; 909037178   |
|  | Descrizione del Prodotto  | [testo]               | Segnale limite 30 Km/h, palo dritto su supporto per segnaletica permanente per new jersey centrale monofilare e bifilare.         |
|  | Riferimenti Produttore  | [testo]               | <a href="https://www.sisas.it">https://www.sisas.it</a>   |
|  | E-mail  | [testo]               | <a href="mailto:info@sisas.it">info@sisas.it</a>  |
| <b>D<br/>A<br/>T<br/>I</b>   | <b>Parametri Identificativi (IfcIdentificativoOggetto):</b>         |                       |   |
|  | Codice libreria Stazione Appaltante                                 | [testo]               | SEG_04  |
|  | Codice WBS  | [testo]               | P01-GA-01-CAN-LF-01-A   |
|  | ID Elemento   | [testo]               | SL-SEG-04   |
|  | Uniclass  | [testo]               | EN_80-35-Ss_20_50   |
| <b>A<br/>L<br/>T<br/>R<br/>O</b>   | <b>Parametri tecnici (IfcTecnico):</b>                              |                       |   |
|  | Scheda Tecnica  | [URL]                 | URL_1   |
|  | Certificazione  | [URL]                 | URL_2   |
|  | Certificazioni Supplementari  | [URL]                 | URL_3   |
|  | Certificazione di Collaudo  | [URL]                 | URL_4   |
|  | Uso e ciclo di vita   | [URL]                 | URL_5   |
|  | Materiale 1   | [testo]               | Ferro   |
| Materiale 2  | [testo]   | Alluminio             |   |
| <b>MANUTENZIONE</b>  |   |                       |   |
| <b>P<br/>R<br/>O<br/>P<br/>R<br/>I<br/>E<br/>T<br/>A<br/>'<br/>M<br/>O<br/>D<br/>E<br/>L<br/>L<br/>O</b> | <b>Parametri Generali Manutenzione (IfcAnagraficaBaseM):</b>        |                       |   |
|  | Data di installazione   | [testo] (dd/mm/yyyy)] | 06/11/1998  |
|  | Data ultima manutenzione  | [testo] (dd/mm/yyyy)] | 01/06/2000  |
|  | Scheda di manutenzione  | [URL]                 | URL_6   |
|  | Programmazione temporale manutenzioni                               | [URL]                 | URL_7   |
|  | Tipologia di manutenzione ordinaria prevista (1 manutenzione)       | [testo]               | Sostituzione pellicola  |
|  | Storico manutenzioni/Registrazione Dati Manutenzione                | [URL]                 | URL_8   |
|  | Livello di criticità  | [testo]               | Bassa   |
|  | Esecutore   | [testo]               | Impresa Rossi Spa   |
|  | Nome manutentore  | [testo]               | Mario Rossi   |
|  | Riferimenti manutentore   | [testo]               | 3283333333  |
|  | Note  | [testo]               | sostituzione segnale  |
|  | Foto  | [immagine]            | foto_04.png   |
|  | Data ultima modifica  | [testo]               | 28/11/2023  |
| <b>T<br/>E<br/>S<br/>T<br/>O</b>   | <b>Parametri 4D Manutenzione (IfcInformazioni_4D_M):</b>            |                       |   |
|  | Data inizio attività manutenzione                                   | [testo] (dd/mm/yyyy)] | 01/12/2023  |
|  | Data fine attività manutenzione                                     | [testo] (dd/mm/yyyy)] | 04/12/2023  |
|  | ID Cronoprogramma   | [testo]               | 00_023  |
|  | Stato dell'oggetto  | [testo]               | Intervento a richiesta  |
|  | <b>Parametri Attività Manutenzione (IfcInformazioniAttività_M):</b> |                       |   |
|  | Tipo attività   | [testo]               | Manutenzione a richiesta  |
| Frequenza  | [testo]   | Temporale             |   |
| Manodopera necessaria  | [testo]   | Tecnico semplice      |   |

Figura 8-34 Parametri creati in Revit per un segnale stradale.

### 8.3.4 Collocazione degli elementi all'interno del modello strutturale del sottopasso

Una volta create le famiglie di tutti gli elementi scelti da inserire all'interno del modello sono state caricate nel progetto. Per il loro corretto posizionamento è stata attivata la nuvola di punti e sono stati creati 6 piani di sezione longitudinali al tunnel a partire da una vista in pianta (Figura 8-35) con i quali sezionare la nuvola di punti.

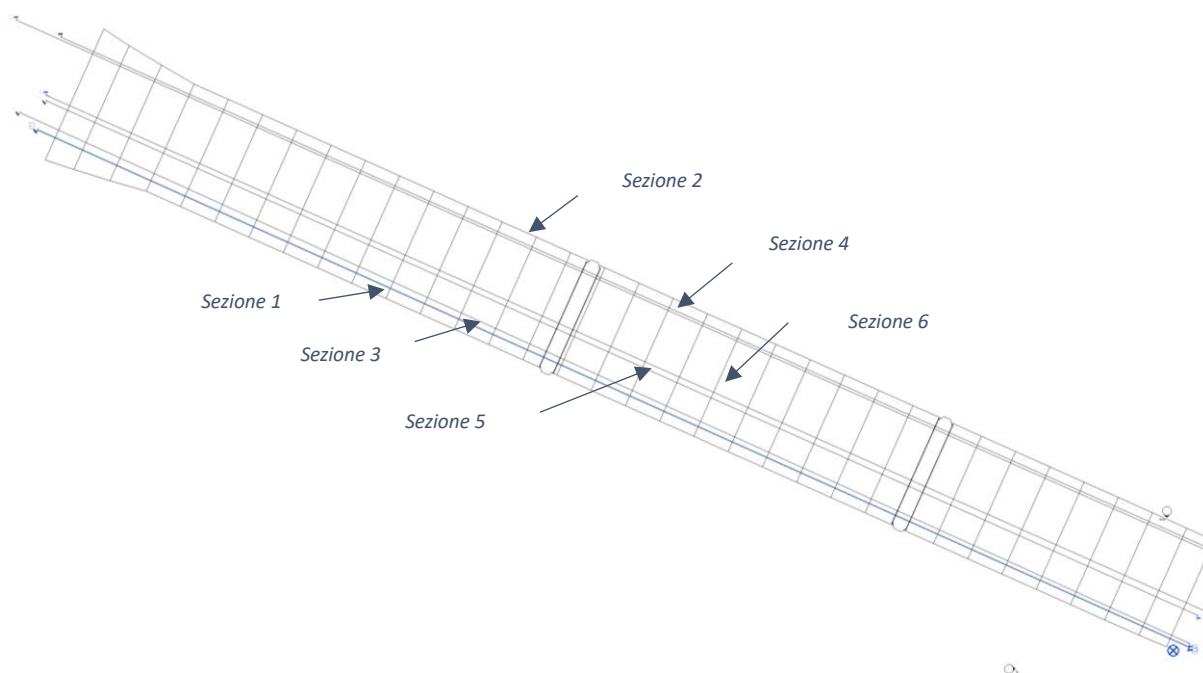


Figura 8-35 Definizione dei piani di sezione nella vista in pianta.

A partire da una vista in prospettiva, invece, sono stati aggiunti dei livelli ovvero dei piani orizzontali di riferimento a cui vincolare e allineare le istanze di alcuni elementi legati agli impianti tecnologici presenti nel sottopasso; in particolare le staffe per le passerelle dei cavi elettrici e le staffe per i dispositivi di illuminazione del tunnel in modo tale da avere un aggiornamento automatico in caso di modifiche (Figura 8-36).

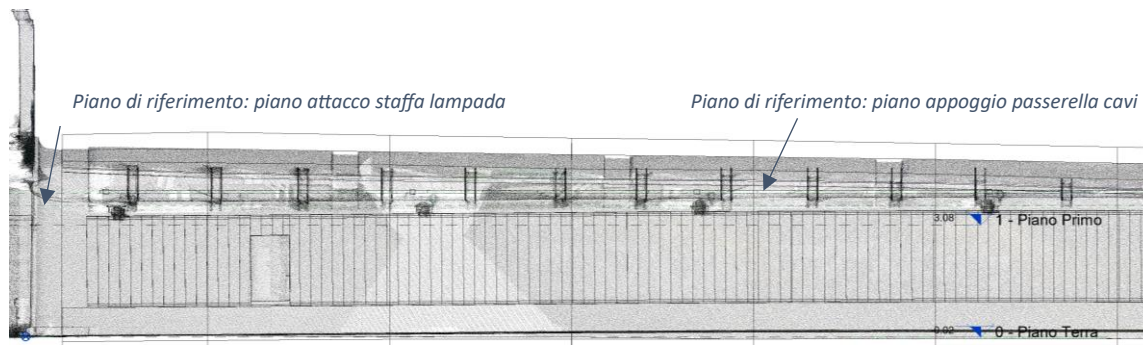


Figura 8-36 Sezione 1 del modello e della nuvola di punti (a sinistra imbocco lato est del sottopasso Lingotto) per il posizionamento dei vari elementi e creazione dei livelli.



#### 8.4 Modello completo del tunnel in Revit ed esportazione in formato IFC

Grazie alla nuvola di punti è stato possibile posizionare correttamente ogni singolo elemento del tunnel modellato.

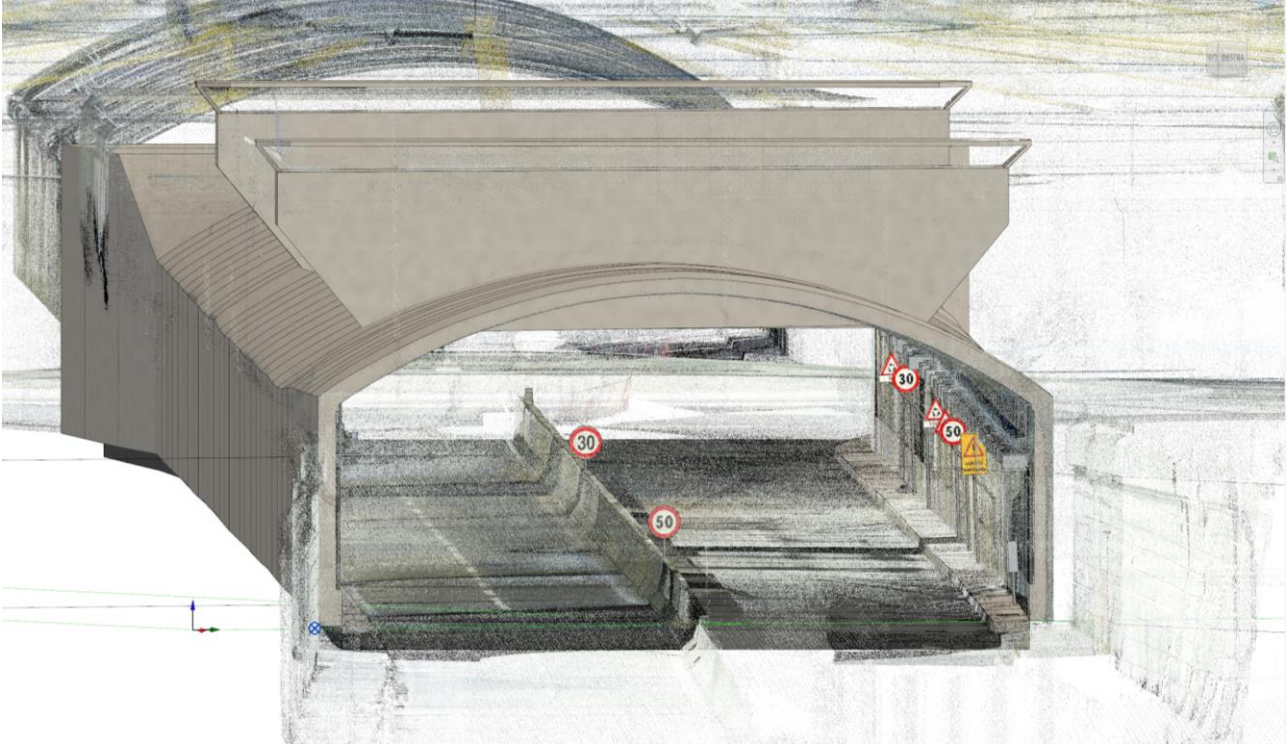


Figura 8-37 Modello in Revit del sottopasso Lingotto con la nuvola di punti da rilievo Laser Scanner.

Il risultato finale è un modello 3D completo di tutti gli elementi principali del tunnel.

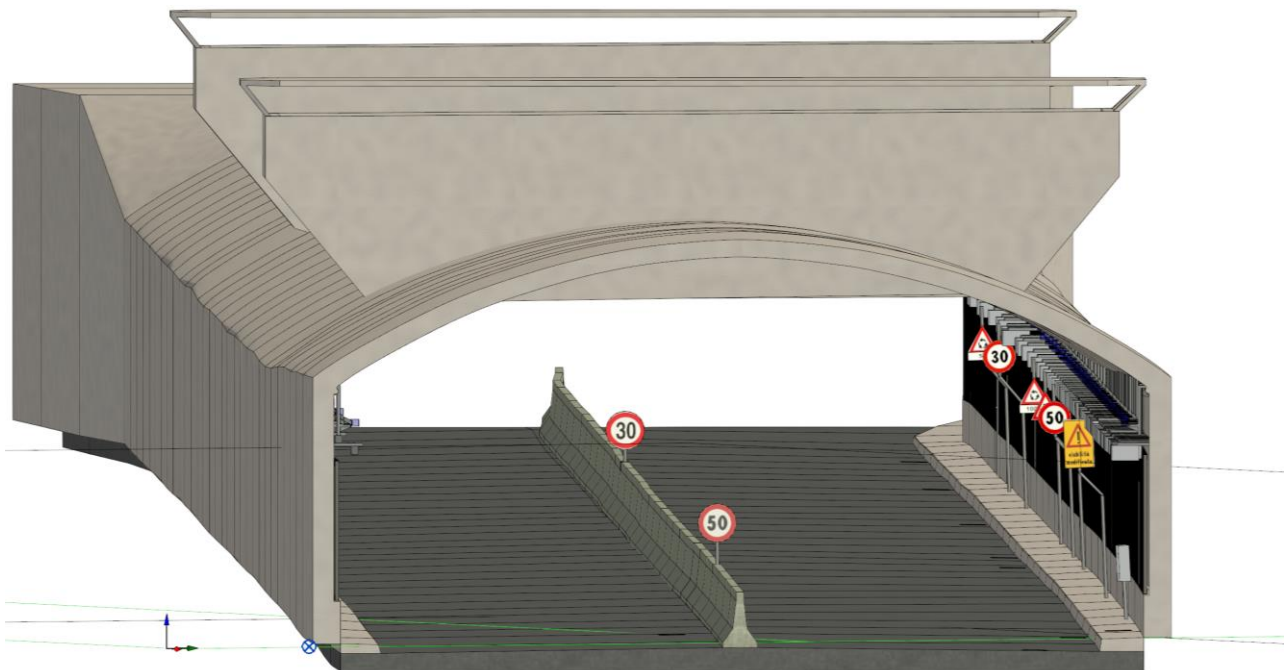


Figura 8-38 Modello in Revit del sottopasso e dei vari elementi.

Una volta completato il modello in Revit è stato possibile esportare il progetto nel formato aperto non proprietario di interscambio IFC (*Industry Foundation Classes*). Esso consente di scambiare e condividere dati durante le fasi di progettazione, costruzione, gestione e manutenzione di un Asset tra tutte le figure coinvolte e di catalogare i dati che costituiscono l'informazione. Per fare ciò prima di tutto è stato necessario impostare alcuni parametri legati alle opzioni di esportazione IFC.

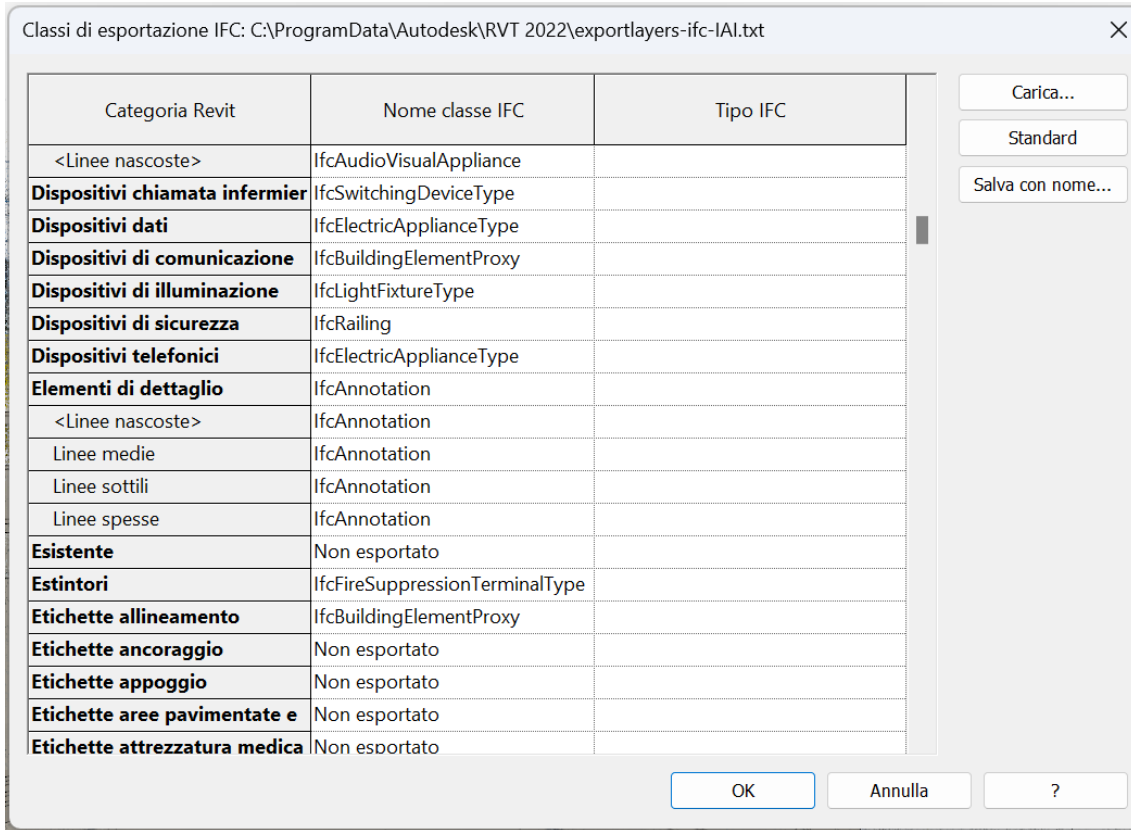


Figura 8-39 Mapping nome classe IFC per ogni categoria in Revit.

Nella finestra di dialogo IFC mapping sono stati inseriti i valori delle classi IFC più appropriate e compatibili con la versione Revit 2022, affinché gli elementi del modello siano esportati nel file IFC in modo corretto evitando gli "Element Proxy".

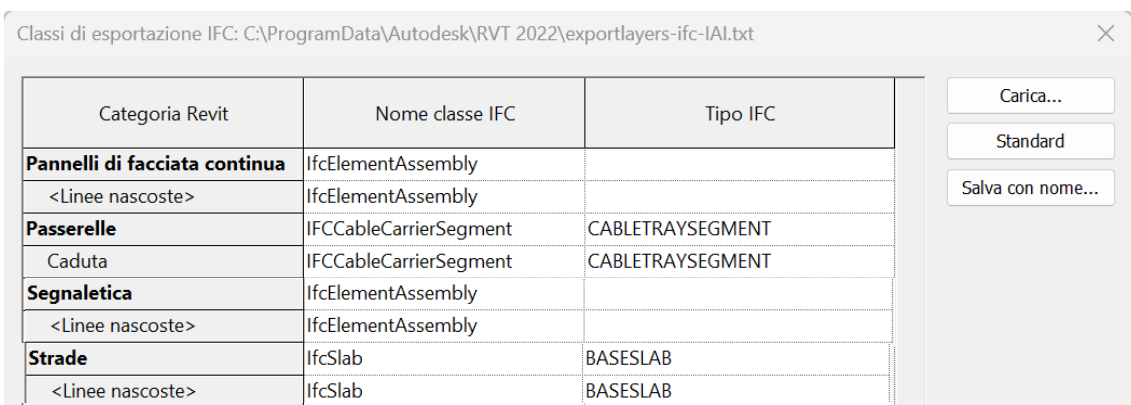


Figura 8-40 Esempio di mappatura delle classi.

Di seguito in Tabella 8-4 vengono riportati i vari elementi, le categorie e il nome della classe IFC assegnate.

| ELEMENTO                                      | CATEGORIA REVIT               | NOME CLASSE IFC        |
|---|-------------------------------|------------------------|
| Pavimentazione                                | Strade                        | IfcSlab                |
| Marciapiede                                   | Strade                        | IfcSlab                |
| Pareti e calotta                              | Pannelli di facciata continua | IfcElementAssembly     |
| Pavimentazione, marciapiedi, pareti e calotta | Pannelli di facciata continua | IfcElementAssembly     |
| Bocca di aereazione                           | Telaio strutturale            | IfcElementAssembly     |
| New Jersey                                    | Dispositivi di sicurezza      | IfcRailing             |
| Pannelli fonoassorbenti e fonoisolanti        | Arredi fissi                  | IfcElementAssembly     |
| Porte   | Porte                         | IfcDoor                |
| Staffe passerella cavi                        | Accessori per tubazioni       | IfcFurniture           |
| Passerella passa cavi                         | Raccordi passerella           | IfcCableCarrierSegment |
| Staffe lampada Galileo 1                      | Arredi                        | IfcFurniture           |
| Staffe lampada Galileo 2 EB Tunnel            | Arredi                        | IfcFurniture           |
| Lampada Galileo 1                             | Apparecchi per illuminazione  | IfcLightFixtureType    |
| Lampada Galileo 2 EB Tunnel                   | Apparecchi per illuminazione  | IfcLightFixtureType    |
| Derivatori                                    | Apparecchi elettrici          | IfcLightFixtureType    |
| Segnaletica verticale                         | Segnaletica                   | IfcElementAssembly     |
| Tombini                                       | Accessori per tubazioni       | IfcFurniture           |

Tabella 8-4 Categorie e nome delle classi IFC degli elementi modellati in Revit.

Diverse sono state le configurazioni di esportazione del modello in formato IFC da Revit; in particolare, diversi tentativi sono stati eseguiti variando i parametri quali ad esempio la spunta "Esporta gruppi di proprietà di Revit" nella scheda "Gruppi di proprietà"; tuttavia, in questo modo venivano esportati in modo automatico molti parametri non utili ai fini del lavoro di tesi (Figura 8-41).

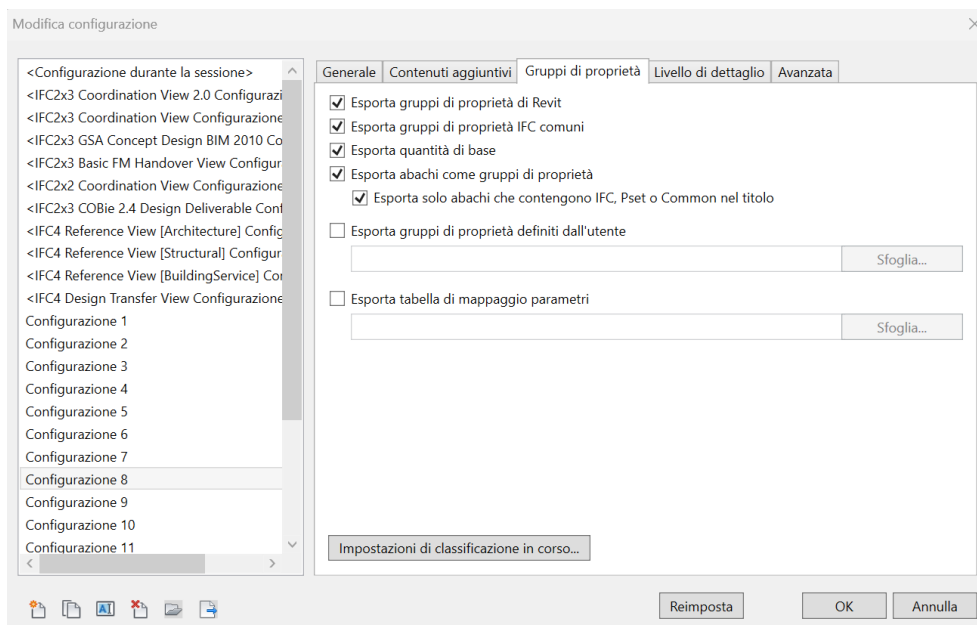


Figura 8-41 Esportazione secondo gruppi di proprietà di Revit.

È stata scelta pertanto la migliore configurazione di esportazione in formato IFC con solo l'opzione "Esporta gruppi di proprietà definiti dall'utente" nella scheda "gruppi di proprietà" usando un file di testo in formato.txt (*Propertyset.txt*) in cui sono state mappate le proprietà da esportare raggruppate secondo le esigenze manutentive dell'opera (*Figura 8-42*).

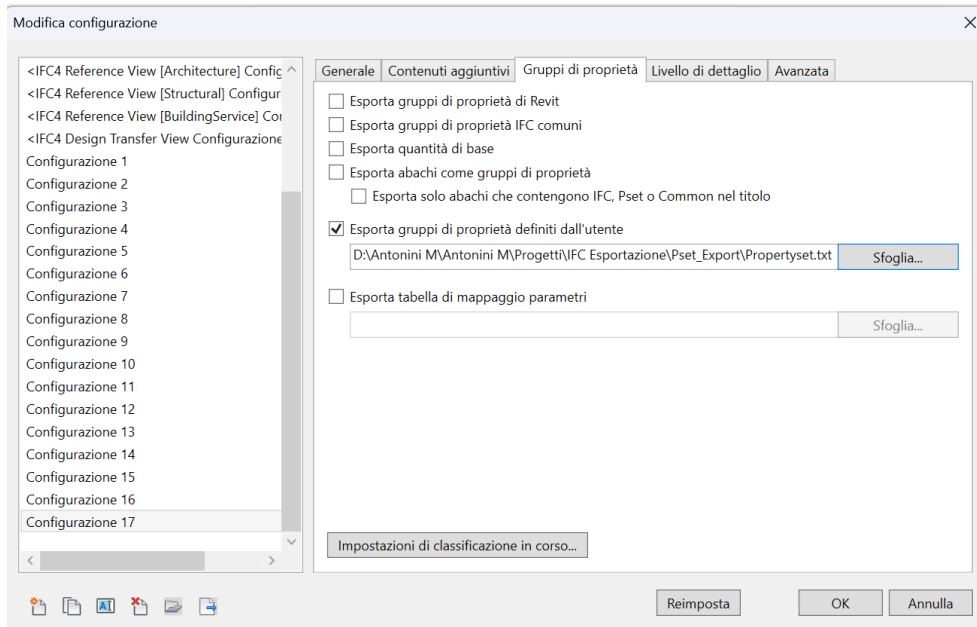


Figura 8-42 Configurazione scelta per l'esportazione del modello in formato IFC

Di seguito in *Figura 8-43* viene riportato un estratto del file di testo utilizzato per il mapping.

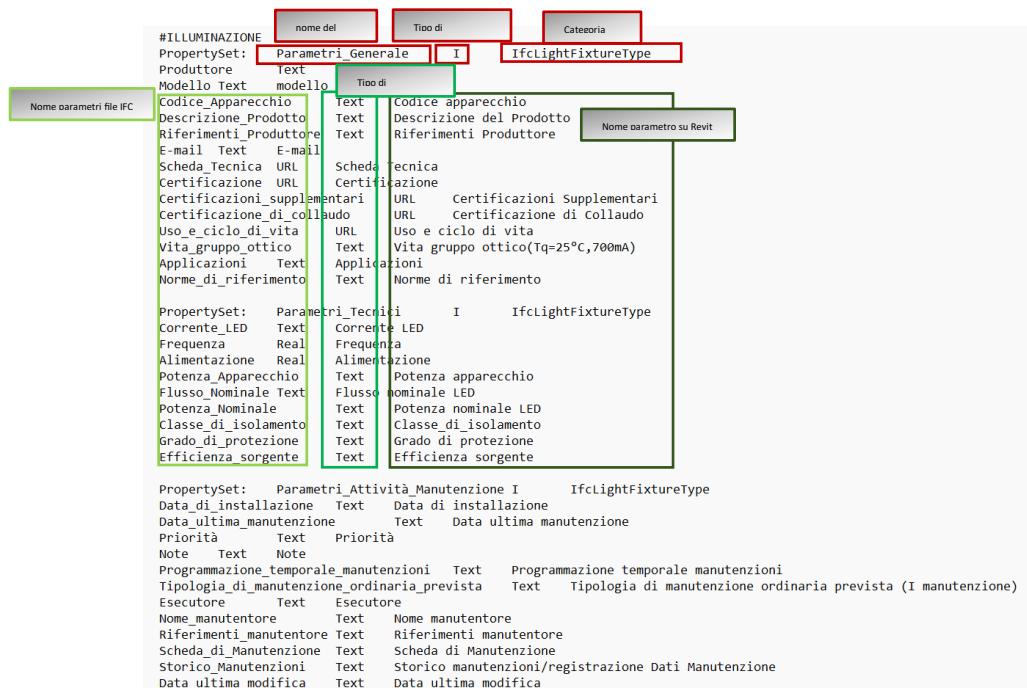


Figura 8-43 Estratto del file di testo per la definizione dei Property Sets per l'esportazione in formato aperto IFC del modello in Revit.

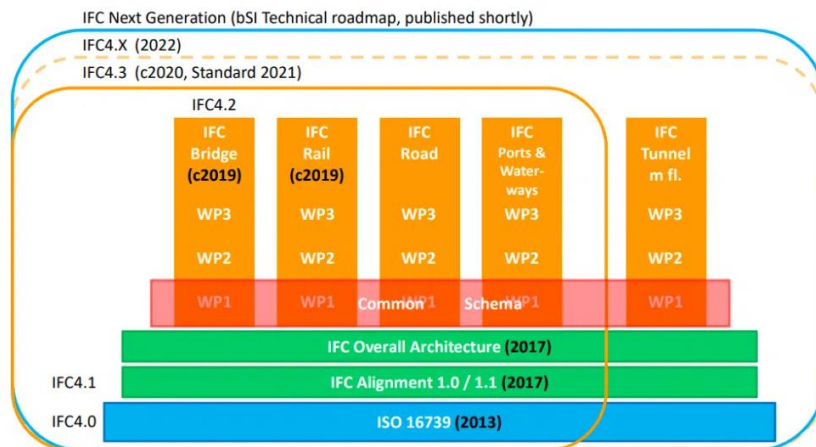
Il file di testo è stato strutturato nel seguente modo:

- la prima riga contiene il nome del Pset, il tipo di parametro e la categoria IFC dove scrivere il Pset;
- la prima colonna contiene il nome dei parametri che vengono scritti sul file IFC;
- la seconda colonna contiene la tipologia di parametro (testo, intero, booleano);

- la terza colonna il nome del parametro sul modello in Revit.

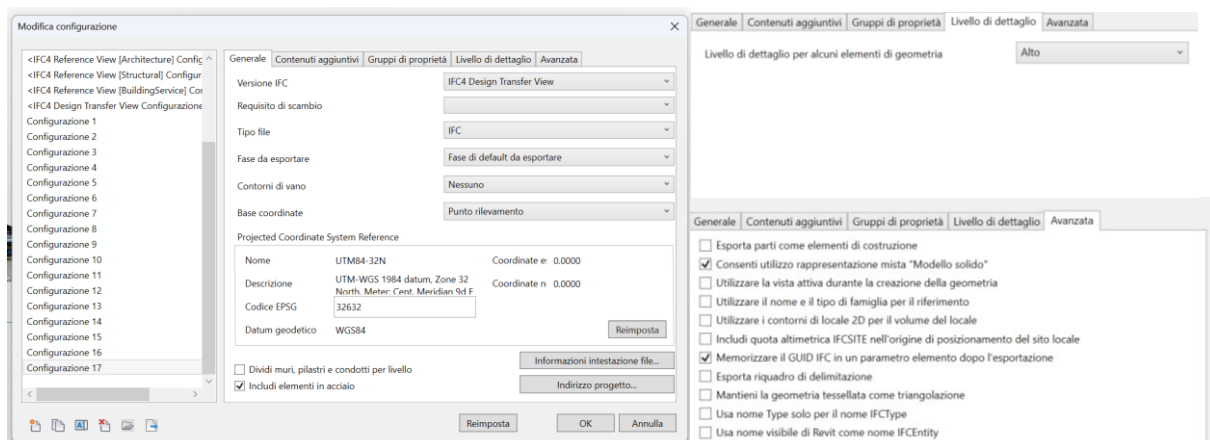
Le informazioni durante la fase di esportazione sono state quindi raggruppate in set di proprietà personalizzati; sono stati scelti i parametri e le geometrie da esportare in formato aperto IFC per la corretta visualizzazione del modello InfraBIM nella realtà virtuale immersiva.

Inoltre, sono stati impostati nella finestra di dialogo di esportazione IFC in Revit, nella scheda Generale, la configurazione e la versione IFC. Diverse sono le versioni IFC (*Figura 8-44*).



*Figura 8-44 Versioni IFC Building Smart International (Fonte, <https://www.buildingsmart.org/standards/calls-for-participation/ifcroad/>).*

Utilizzando il software Revit 2022 è stato possibile esportare con l'ultima versione disponibile in Revit 2022 ovvero IFC 4.0 mentre come MDV (Model View Definition) è stata scelta la *Design Transfer View*; inoltre, è stato impostato come punto base per le coordinate il *punto di rilevamento* e inserendo il codice EPSG (*European Petroleum Survey Group*) 32632 è stato scelto il sistema di riferimento WGS84/UTM zone 32N (Datum: WGS84 – Proiezione: UTM – Zona: 32N –EPSG: 32632). È stato inoltre scelto un livello di dettaglio "Alto" nella scheda "Livello di dettaglio" e nella scheda "Avanzata" sono state spuntate "Consenti utilizzo rappresentazione mista Modello solido" e "Memorizzare il GUID IFC in un parametro elemento dopo l'esportazione" (*Figura 8-45*). Si è proceduto quindi con l'esportazione del modello in formato IFC.



*Figura 8-45 Configurazione scelta per l'esportazione in formato IFC Versione 4.0.*

Una volta esportato il modello in formato IFC con tutti i dati e le informazioni utili si è proceduto con la sua visualizzazione tramite BIM Viewer gratuiti quali BIMVision e Open IFC Viewer. Grazie alla

visualizzazione del modello in formato IFC è stato possibile controllare la corretta esportazione del modello con i parametri creati e i relativi attributi inseriti (Figura 8-46).

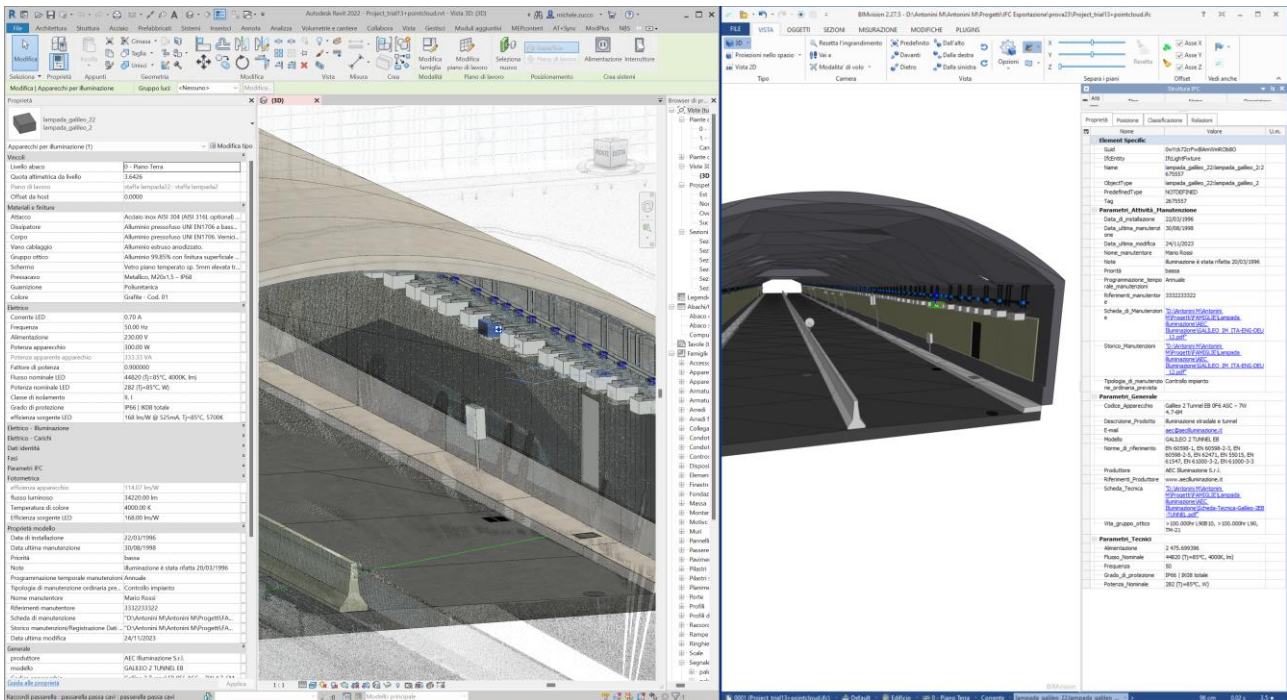


Figura 8-46 Dispositivo di illuminazione con i parametri per la manutenzione in Revit e visualizzazione in BIMVision del file IFC esportato.

Inoltre, è possibile visualizzare le coordinate di ogni singolo elemento presente nel modello IFC del tunnel nel sistema di riferimento globale scelto.

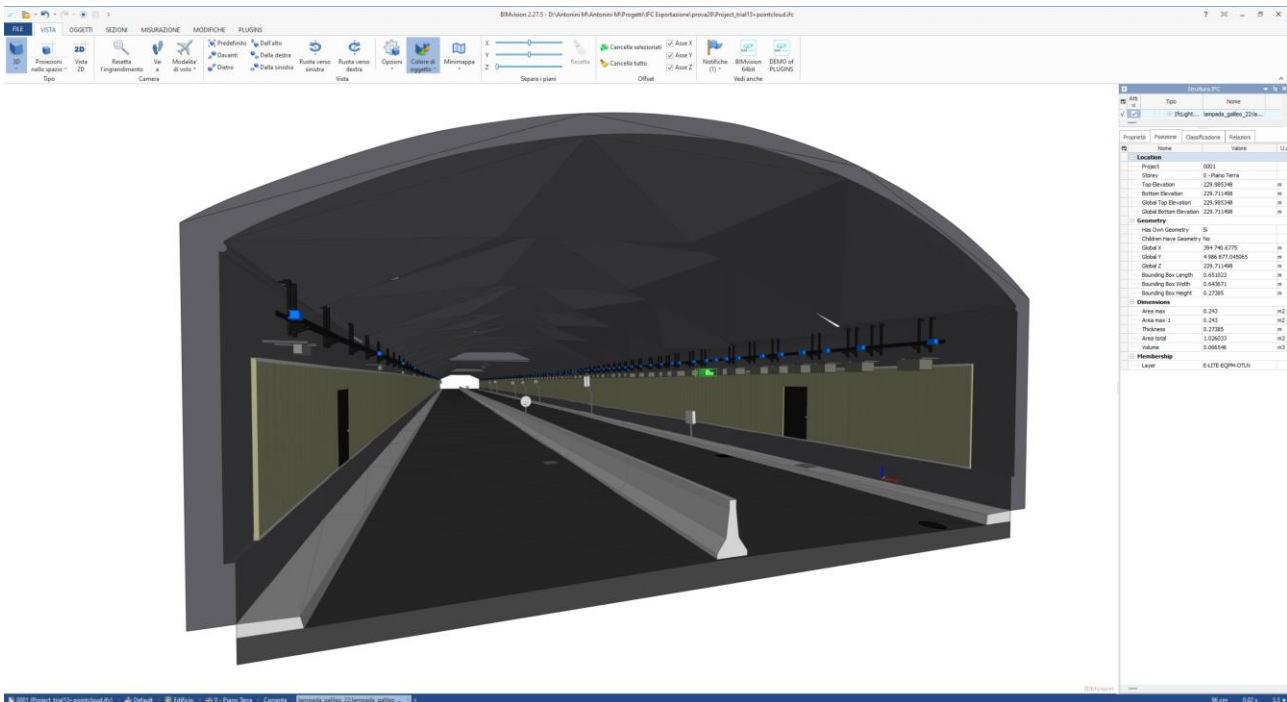


Figura 8-47 Visualizzazione delle coordinate di un dispositivo di illuminazione in BIMVision del file IFC esportato.

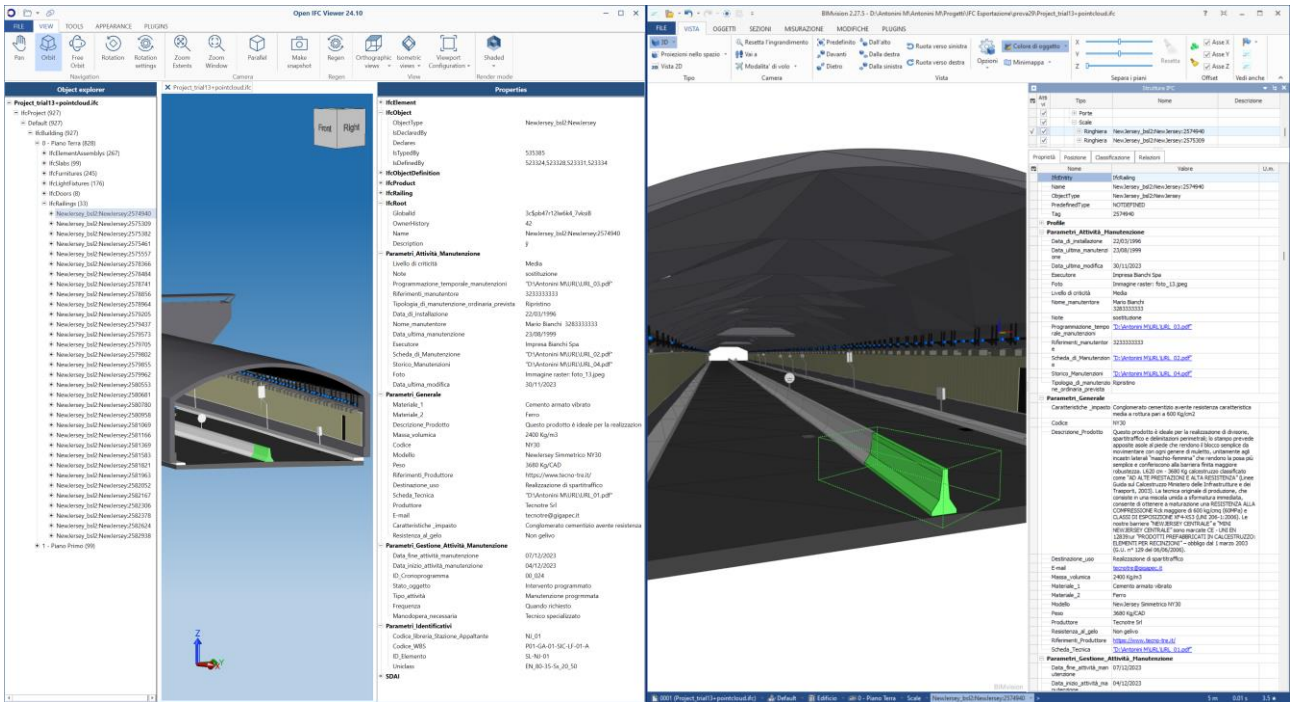


Figura 8-48 Visualizzazione dei parametri relativi ad un elemento del tunnel (dispositivo di ritenuta) all'interno di due Bim Viewer gratuiti (Open IFC Viewer e BIMVision).

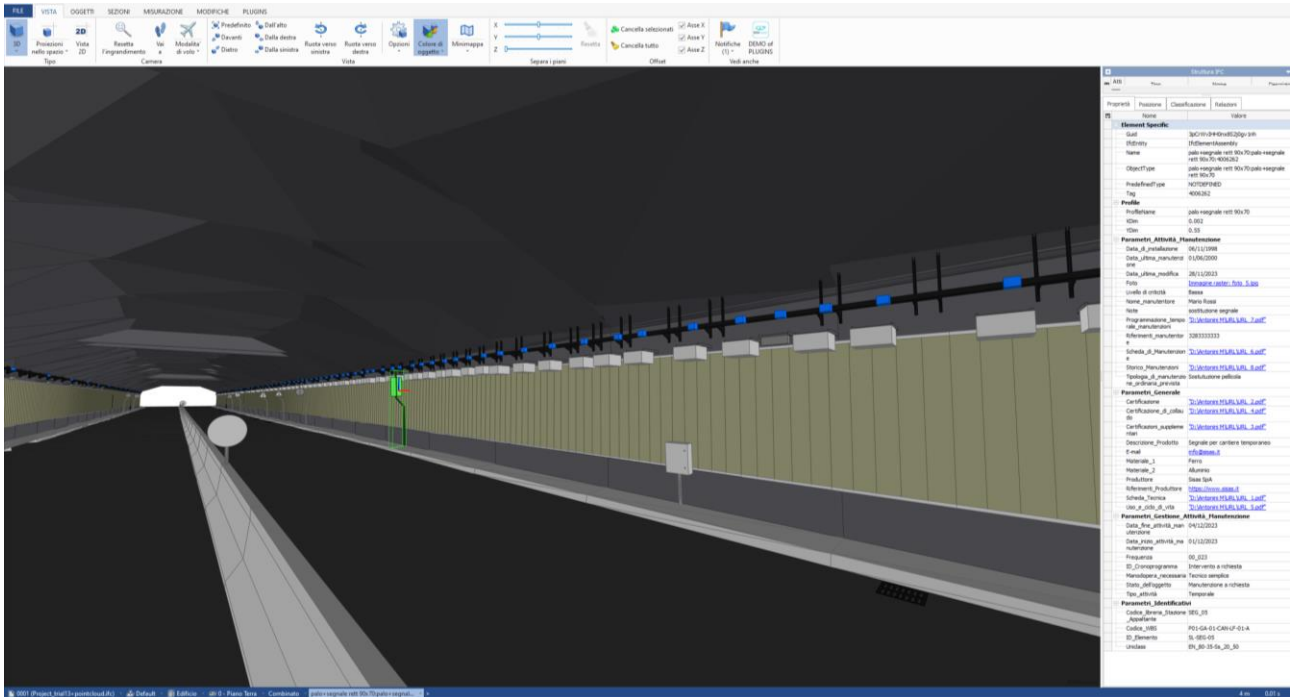


Figura 8-49 Visualizzazione del segnale di viabilità modificata con i parametri per la manutenzione in BIM VISION secondo i Property Set scelti.

## 8.5 Visualizzazione e ispezione in realtà virtuale del modello IFC con la nuvola di punti

Per il caso studio è stato impiegato come dispositivo HTC Vive che è stato sviluppato dall'azienda Valve ed è in commercio dal 2016.



Figura 8-50 HTC Vive

Per la visualizzazione del modello in Realtà Virtuale è stato impiegato l'applicativo VREX PRO. Una volta creato un nuovo progetto sono stati caricati sia il modello in formato IFC sia la nuvola di punti in formato .E57. Infine, è stata creata una stanza virtuale all'interno della quale poter visualizzare il modello, creare issue, invitare membri e avviare una sessione collaborativa.

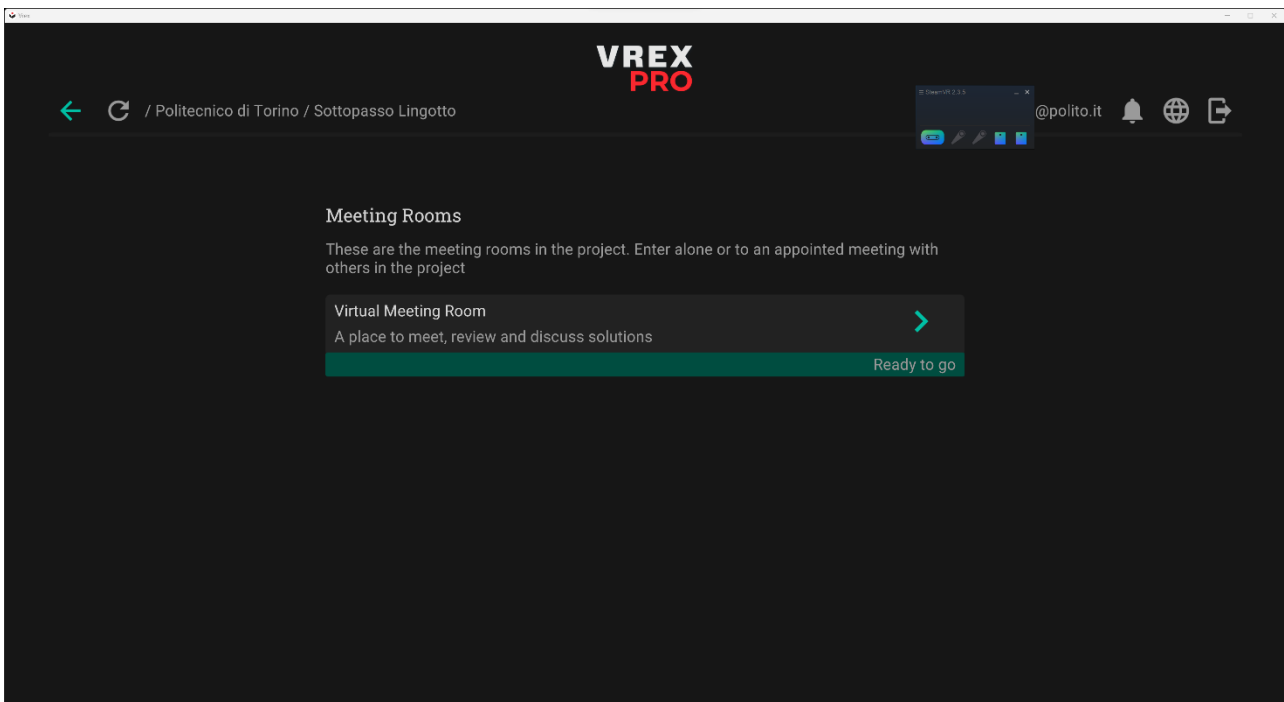
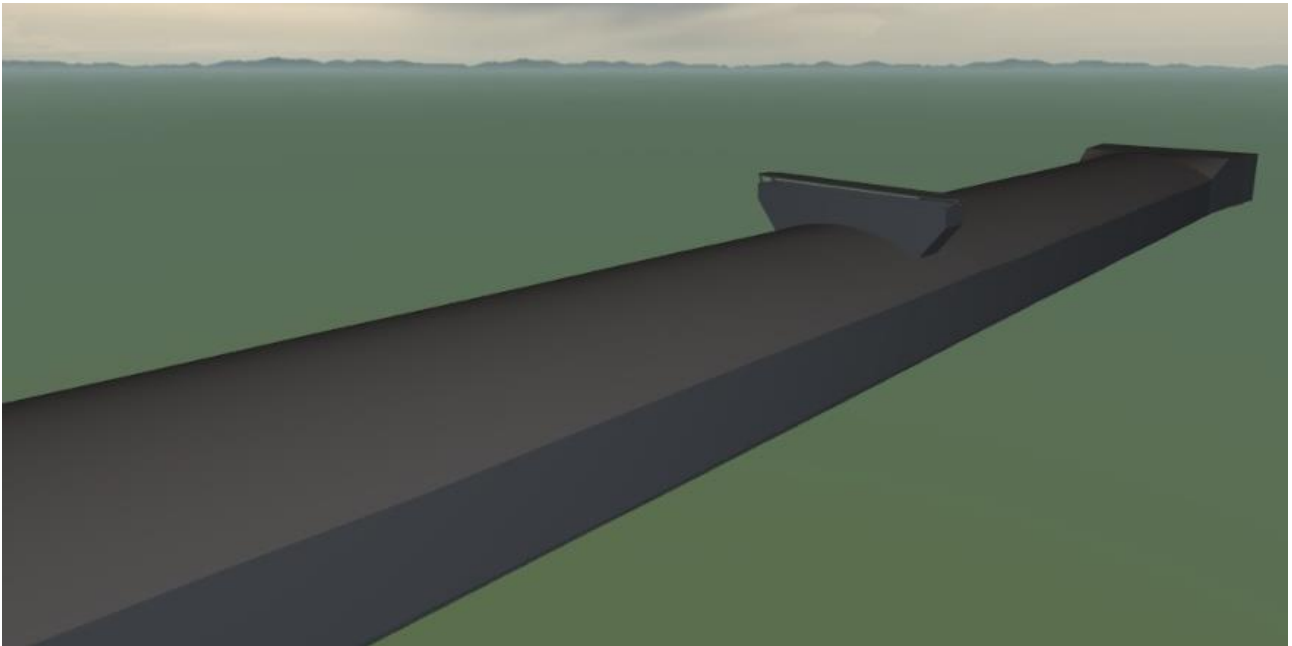


Figura 8-51 Avvio della stanza virtuale all'interno di VREX PRO.

La Realtà Virtuale è un potente strumento di visualizzazione grafica di un'opera esistente. Consente, infatti, la trasmissione immediata all'utente finale delle caratteristiche funzionali ed estetiche che caratterizzano il manufatto.





*Figura 8-52 Modello IFC importato in realtà virtuale (applicativo VREX PRO) vista del tunnel esterno dall'alto.*



*Figura 8-53 Visualizzazione del modello IFC importato in realtà virtuale (applicativo VREX PRO) con nuvola di punti georeferenziata dell'imbocco lato est del sottopasso lingotto.*

Offre, inoltre la possibilità di:

- visualizzare e navigare il modello virtuale con o senza la nuvola di punti;
- verificare eventuali errori costruttivi;
- misurare lo scostamento tra nuvola di punti e modello IFC;
- eseguire un'ispezione;
- visualizzare rapidamente e in modo preciso i parametri assegnati ad ogni elemento su Revit ed esportati nel file IFC;
- interrogare ogni elemento riguardo alla sua posizione nello spazio tridimensionale;
- eseguire delle misurazioni precise di qualsiasi elemento direttamente dal modello.

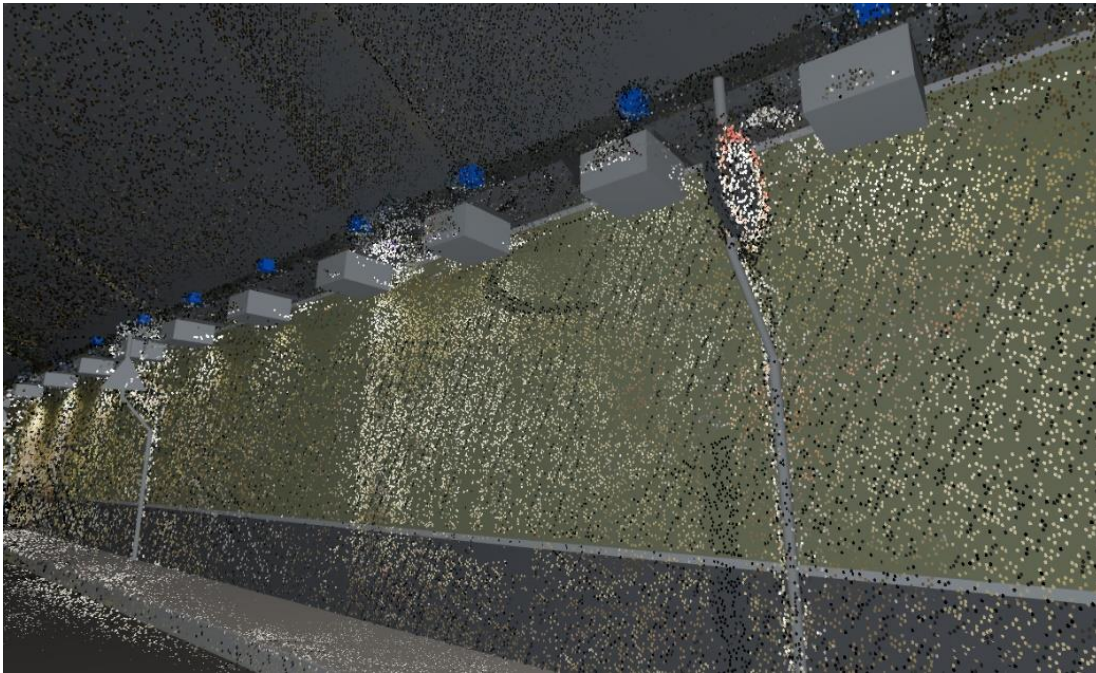


Figura 8-54 Visualizzazioni dei vari elementi della galleria e verifica del loro corretto posizionamento e scostamento rispetto alla point cloud (segnale limite di velocità 50 Km/h).

Selezionando sugli asset di interesse è possibile analizzare tutte le informazioni connesse. Di seguito vengono mostrati i 4 macrogruppi (cluster) creati attraverso il file di testo di mappatura dei Pset: Pset\_Attributes, Pset\_Properties, Pset\_Quantities e Pset\_Materials.

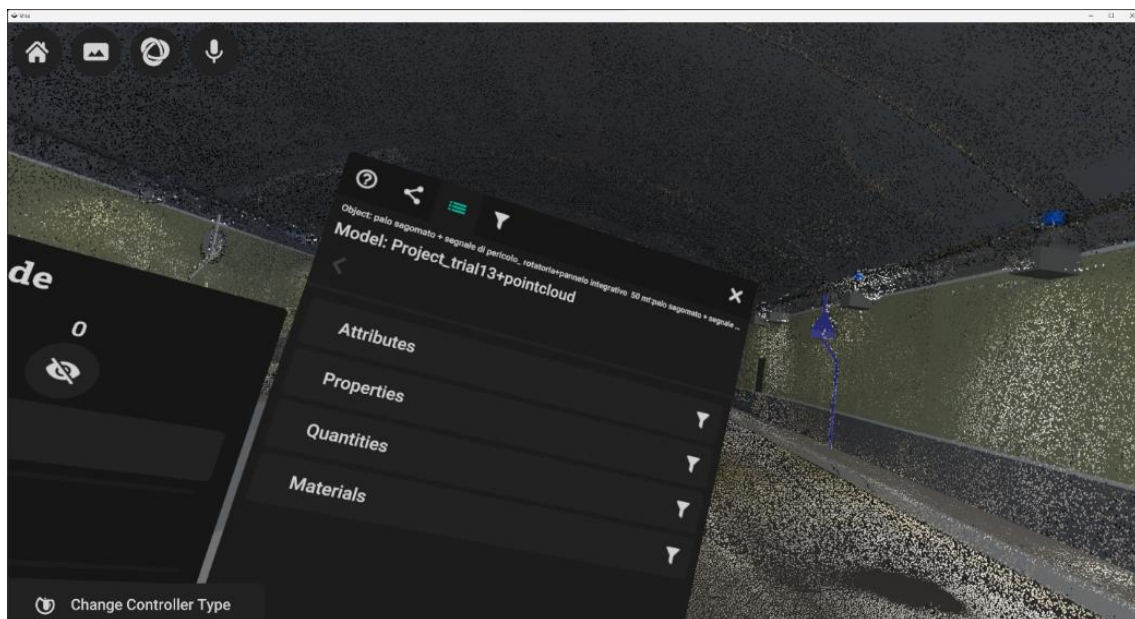


Figura 8-55 Visualizzazione dei quattro raggruppamenti all'interno dei quali sono inseriti i vari parametri nel modello IFC.

Riguardo al cluster di parametri Pset\_Properties è stato a sua volta diviso in:

- Parametri generale;
- Parametri identificativi;
- Parametri tecnici;
- Parametri\_Attività\_Manutenzione;
- Parametri Gestione Attività Manutenzione.

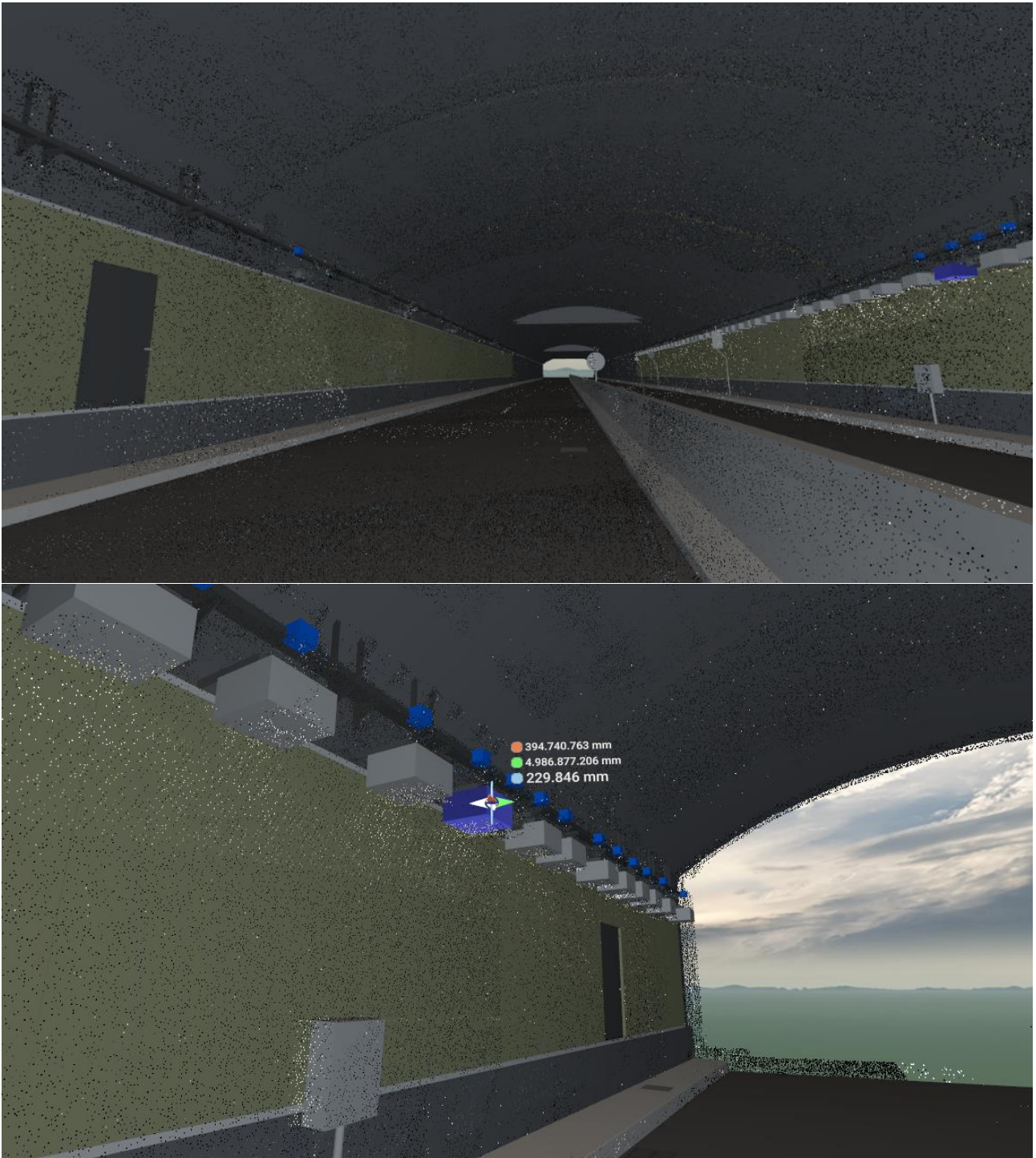


Figura 8-56 Selezione di un elemento (lampada AEC Galileo 2 EB Tunnel) in Realtà Virtuale (figura sopra) e determinazione delle coordinate di ogni singolo elemento nel sistema di riferimento UTM – ETRF2000 – WGS84 fuso 32N (esempio lampada AEC Galileo 2 EB Tunnel) tramite applicativo VREX PRO (figura sotto).

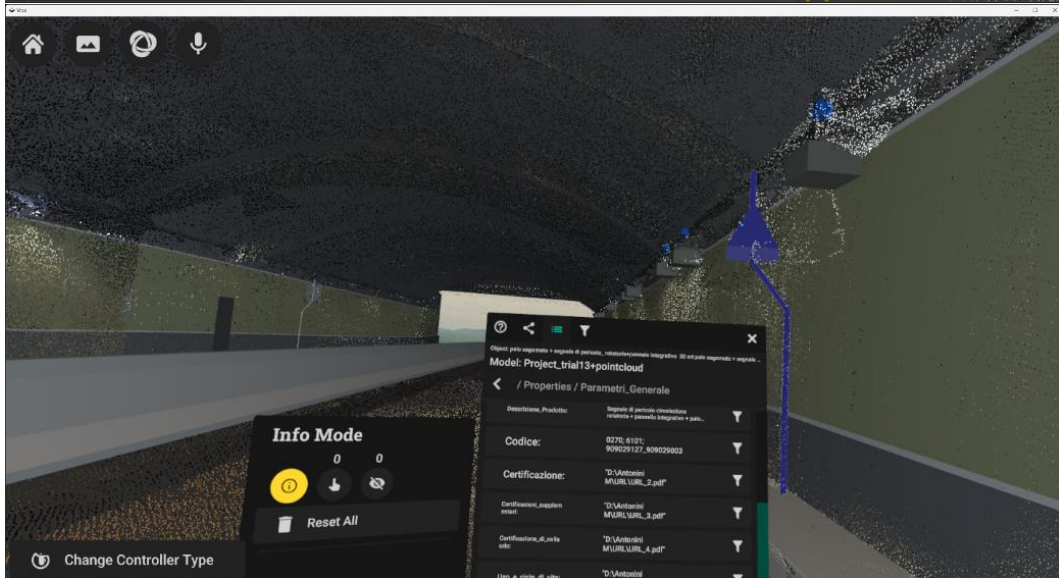


Figura 8-57 Esempio di elemento del tunnel stradale (segnale di pericolo rotatoria con pannello integrativo) selezionato (sopra) e visualizzazione dei suoi parametri generali (sotto) in ambiente VREX PRO.

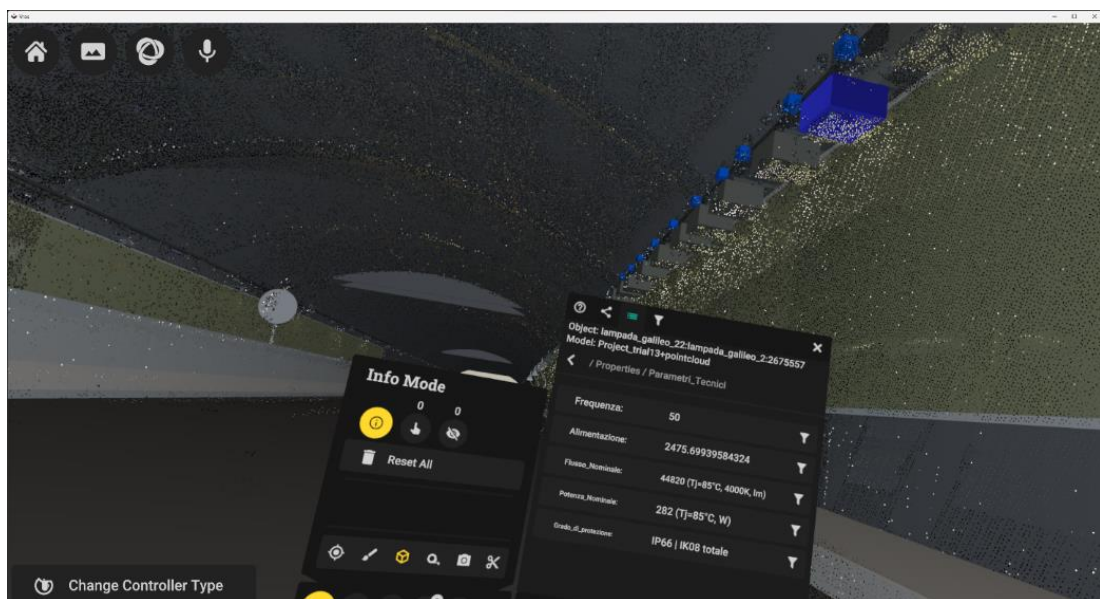


Figura 8-58 Visualizzazione in VREX PRO dei vari attributi all'interno del gruppo parametri tecnici per il dispositivo di illuminazione.

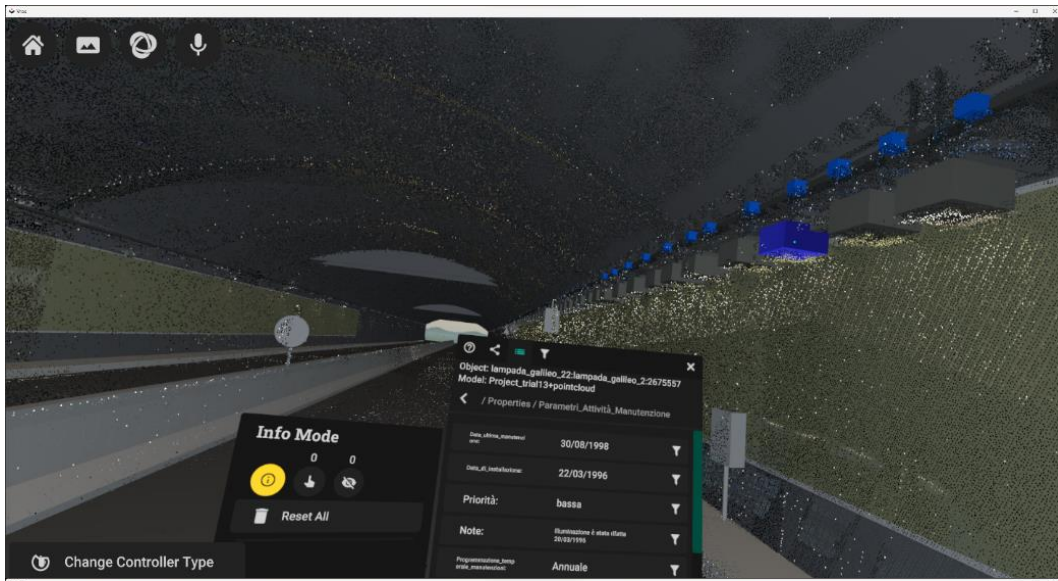


Figura 8-59 Visualizzazione in VREX PRO dei vari attributi all'interno del gruppo parametri relativi all'attività di manutenzione per il dispositivo di illuminazione

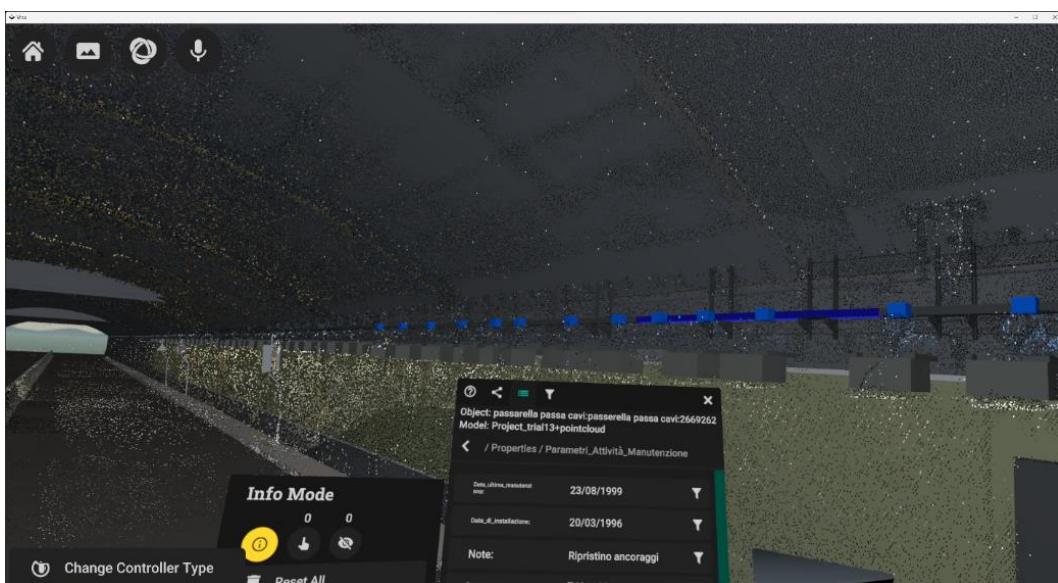


Figura 8-60 Visualizzazione in VREX PRO dei vari attributi all'interno del gruppo parametri relativi all'attività di manutenzione per la passerella cavi.

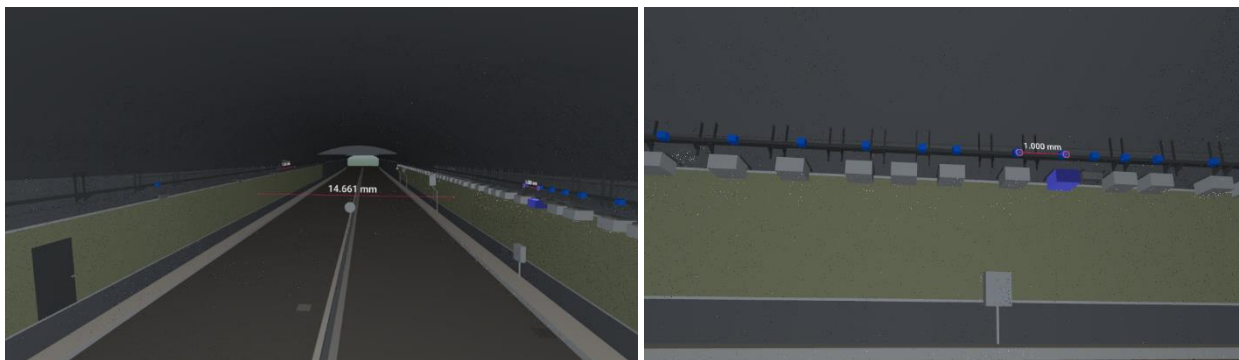


Figura 8-61 Misurazioni di distanze in VREX PRO tra i vari elementi (distanza tra i pannelli fonoassorbenti in alto e distanza tra due derivatori dell'impianto di illuminazione).

Inoltre, in VREX PRO è possibile creare e gestire *issue* grazie al formato BCF. BCF è l'acronimo di BIM Collaboration Format. È uno standard internazionale aperto sviluppato da buildingSMART International nel 2009 per facilitare le comunicazioni e migliorare il coordinamento in un flusso di lavoro basato sui modelli IFC. È un formato che consente di semplificare la comunicazione e lo scambio di informazioni tra i vari attori coinvolti che collaborano sullo stesso modello BIM. Tale formato aperto consente di aggiungere note, commenti, segnalazioni e immagini ad un modello BIM in formato IFC. Tutto ciò viene gestito all'interno di una piattaforma (BIM Collaboration) che registra chi e quando ha inserito un commento o una nota. È quindi un formato di interscambio non utilizzato per comunicare informazioni geometriche, ma di carattere grafico/descrittivo in grado di illustrare ed agevolare *issue* da dover gestire e risolvere.

La struttura del formato BCF è composta da:

- viste del modello catturate in formato immagine (PNG);
- coordinate che esprimono la posizione del punto di vista dello scatto all'interno del file IFC;
- commenti relativi agli elementi del modello collegati mediante ID univoci globali (GUID) per localizzare con precisione il problema all'interno del progetto.



Figura 8-62 Assegnazione di un'immagine al BCF creato.

I vantaggi del formato BCF sono:

- migliore coordinamento;
- comunicazione più efficiente (chiara e precisa);
- storicizzazione delle comunicazioni;
- assegnazione trasparente dei compiti;
- gestione delle responsabilità;
- gestire issues;
- comunicare le informazioni del progetto;
- condivisione dei problemi tramite file o sincronizzazione su piattaforma in cloud.

Nel caso in esame è stato assegnato a ogni issue un titolo univoco ed esplicativo, una breve descrizione che chiarisce il compito o il problema, assegnato un responsabile per la sua risoluzione e inserito un'immagine che ben rappresenti il problema.

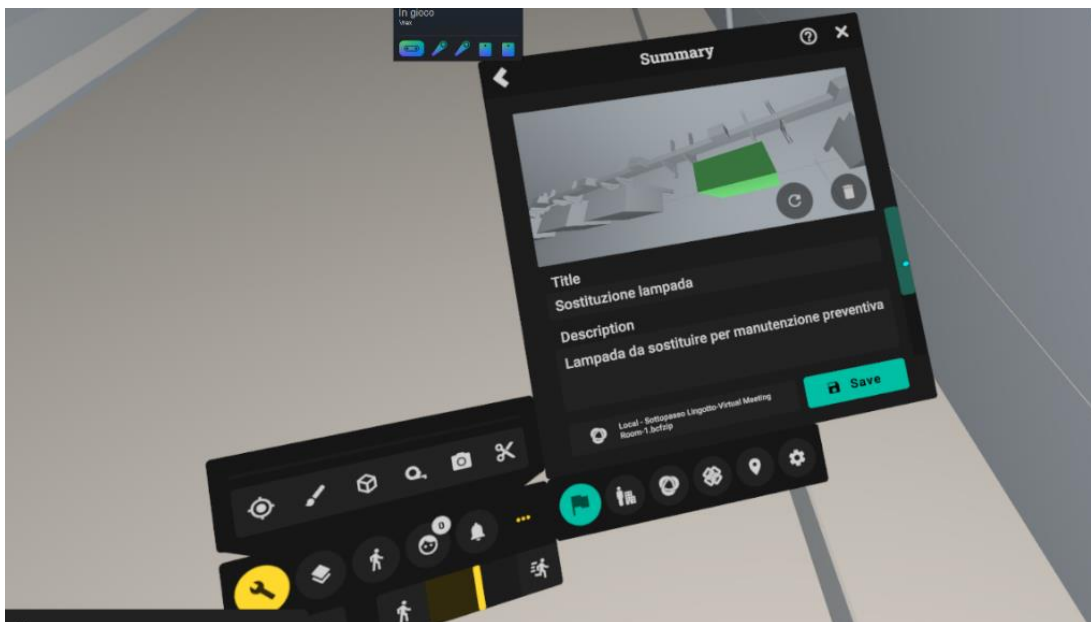


Figura 8-63 Titolo e descrizione del BCF creato.

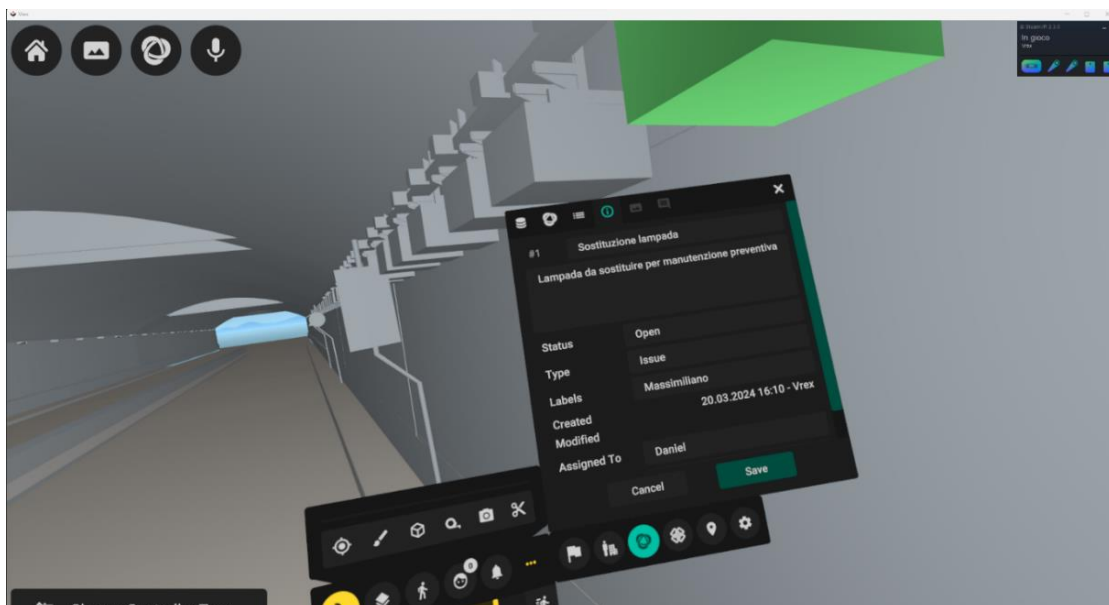


Figura 8-64 Visualizzazione del BCF con lo stato, data di creazione e assegnazione.

## 9. Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente lavoro di tesi nasce dalla necessità di trovare degli strumenti tecnologici in grado di facilitare e aiutare la gestione, il monitoraggio e la manutenzione del vasto patrimonio infrastrutturale esistente. Sempre più gestori e PA necessitano di modelli “as-is” utili alla gestione, al monitoraggio e alla manutenzione del proprio Asset.

Partendo da queste considerazioni, si è scelto di analizzare la metodologia SCAN-TO-BIM applicandola ad un’infrastruttura reale scelta come caso studio del presente lavoro di tesi: il sottopassaggio Lingotto.

Gli obiettivi principali del seguente lavoro di tesi erano:

- valutare la metodologia SCAN-TO-BIM, ovvero il passaggio da nuvola di punti a modello BIM, e le sue criticità;
- valutare in termini di scarto quadratico medio l’output del post-processamento dei dati LiDAR e valutare i tempi di trattamento delle scansioni;
- realizzare tramite software di BIM Authoring un modello infrastrutturale digitale 3D con le informazioni utili al proprietario dell’opera per una valutazione dello stato di fatto e per la fase di gestione e manutenzione;
- capire come strutturare e catalogare i dati all’interno del modello InfraBIM;
- verificare l’interoperabilità tra i software di gestione delle nuvole di punti e il software Autodesk Revit;
- esportare il modello in formato aperto di interscambio IFC (Industry Foundation Classes);
- visualizzare il modello in formato IFC ed eseguire ispezioni virtuali dell’opera;
- interrogare gli elementi, visualizzare i parametri inseriti legati al monitoraggio e alla gestione e manutenzione dell’asset e filtrare in base a un determinato parametro (priorità di intervento);
- gestire issues legati agli elementi del tunnel attraverso una piattaforma di collaborazione dove è possibile condividere con i diretti interessati le informazioni necessarie alla manutenzione.

Come dimostra questa ricerca la metodologia SCAN-TO-BIM è una metodologia innovativa per effettuare la digitalizzazione, l’ispezione e il monitoraggio di infrastrutture esistenti. Si tratta di un processo ovvero un insieme di attività correlate che trasformano elementi in ingresso (nuvole di punti) in elementi in uscita (modelli digitali as-is). Il caso studio scelto ha consentito di verificare l’applicabilità della procedura SCAN-TO-BIM alle infrastrutture lineari e discutere pregi e difetti del flusso di lavoro organizzato a partire da rilievo Laser scanner. Inoltre, ha dato modo di analizzare l’interoperabilità tra i software di gestione delle nuvole di punti e i software di modellazione BIM.

Il processo è iniziato da dati laser scanner e immagini digitali forniti che rappresentano le caratteristiche fisiche e geometriche del sottopasso. Il processo di gestione dei dati laser scanner è stato complesso poiché ha richiesto una preelaborazione con due software. Le singole scansioni sono state allineate, georeferenziate utilizzando un software specifico proprietario e successivamente editate tramite il software open-source Cloud Compare dove sono state filtrate e pulite, sottocampionate e unite in un’unica nuvola di punti. Il laser scanner è uno strumento che non ha la possibilità di selezionare i punti da rilevare; durante le operazioni di misura con tecnica LiDAR sono stati registrati innumerevoli dati non necessari ai fini del rilievo. Data l’elevata rumorosità dei dati grezzi di partenza a causa della presenza di punti acquisiti su superfici riflettenti e del passaggio



di macchine nella carreggiata opposta durante la sessione di misura è stato necessario procedere con la filtratura prima e la pulitura dopo tramite gli strumenti messi a disposizione del software CloudCompare che consentono l'eliminazione dei punti manuale o automatica.

Il processo di pulitura e sottocampionamento ha consentito di ottimizzare la nuvola di punti per la fase successiva di modellazione. La fase di modellazione iniziale ha presentato alcuni problemi legati alla definizione dei profili a partire dalle sezioni estratte da CloudCompare per costruire il modello strutturale del sottopasso. Il passo fondamentale del flusso di lavoro è stato l'importazione della nuvola di punti all'interno del software BIM Autoesk Revit dopo essere stata indicizzata con Autodesk ReCap PRO. La nuvola di punti, tramite il software, è stata orientata e allineata in modo tale da adattarsi al sistema di coordinate del progetto. Una volta integrata in Revit si è proceduto con la creazione del modello BIM strutturale del sottopasso grazie al linguaggio visuale di programmazione Dynamo che ha consentito di allineare con la nuvola di punti le varie famiglie adattive nidificate relative alle varie sezioni estratte da CloudCompare.

Successivamente sono state create le famiglie caricabili dei vari elementi del tunnel scelti basati sui dati di scansione acquisiti. Durante la fase di caratterizzazione degli oggetti è stato necessario definire il template e la categoria più appropriati e sono stati creati i parametri utili per la gestione e manutenzione dell'Asset.

Il seguente lavoro svolto dimostra come il passaggio dalla nuvola di punti al modello BIM è un processo lungo e laborioso e non automatico. Tuttavia, consente di acquisire enormi quantità di dati molto accurati in poco tempo. Il lavoro di tesi ha consentito di valutare l'effettiva capacità della metodologia SCAN-TO-BIM di fare una fotografia dello stato attuale dell'opera. Tuttavia, i limiti e i problemi riscontrati indicano che questa procedura è ancora nelle prime fasi e che sono necessarie ampie sperimentazioni per rendere completamente automatico il processo.

Il modello creato per questa tesi potrà essere utilizzato in futuro dall'Ente Gestore per l'ispezione, per il monitoraggio dei vari elementi del tunnel, per la previsione e valutazione dello stato di danno e per programmazione degli interventi di manutenzione. Grazie al modello InfraBIM e uno storico degli interventi fatti aggiornato il Gestore potrà prevenire danni rilevanti e individuare più velocemente ogni elemento che necessita di manutenzione.

Sviluppi futuri comprendono lo sviluppo di software in grado di ridurre i tempi necessari per ottenere un modello digitale a partire da una nuvola di punti; difatti questo processo di modellazione sarà sempre più automatizzato grazie anche all'ausilio dell'intelligenza artificiale che consentirà di riconoscere e catalogare i vari elementi. Inoltre, sono ancora presenti ad oggi problemi di interoperabilità tra software di elaborazione dati da laser scanner e software BIM.

Sviluppi futuri si basano sulla possibilità di passare da un modello statico ad uno dinamico tramite l'interconnessione, l'installazione e l'utilizzo dei dispositivi IoT e sensoristica per la ricezione ed il monitoraggio dei dati in tempo reale creando un gemello digitale dell'opera. Tali sistemi garantiscono un monitoraggio continuo. Occorre quindi connettere il modello digitale creato ai dispositivi IoT per la visualizzazione e l'aggiornamento dei dati in tempo reale.

## Bibliografia

- [1] A. Osello, A. Fonsati, N. Rapetti, F. Semeraro, *"InfraBIM, Il BIM per le infrastrutture"*, Gangemi Editore, 2015.
- [2] Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio delle gallerie esistenti, pp.5-10, 2022.
- [3] PIARC, *"Good Practices in Maintenance and Traffic Operation of Heavy Trafficked Urban Road Tunnels"*, technical report, 2022R34EN.
- [4] S. Pozzoli, M. Bonazza, S. W. Villa, *"Autodesk Revit 2022 per l'architettura. Guida completa per la progettazione BIM"*, 2021.
- [5] A. Osello, *"Building information modelling. Geographic information system. Augmented reality per il facility management"*, Dario Flaccovio Editore, 2015.
- [6] Gruppo24Ore, *"Linee guida BIM per studi, imprese e committenti"*, 2022.
- [7] C. Eastman, *"Il BIM: Guida completa al Building Information Modeling per committenti, architetti, ingegneri, gestori immobiliari e imprese"*, 2016.
- [8] V. Albino, A. Ferrara., *"La gestione informativa degli appalti BIM Guida operativa per la digitalizzazione del processo edilizio aggiornata a DM 312/2021 e ISO 19650:2019"*, Dario Flaccovio Editore, 2022.
- [9] A. Osello, F. Ugliotti, M. Francesca, F. Semeraro *"Il BIM orientato al Facility Management"*, 2016, pp. 1-7.
- [10] L. Bornaz, F. Rinauldo, *"Il rilievo e l'elaborazione dei dati laser scanner"*, Politecnico di Torino, 2024.
- [11] V. A. Girelli, Tesi di dottorato di ricerca, *"Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione nel campo dei beni culturali"*, 2007.
- [12] A. Rossi, U. Palmieri, *"LOD per il patrimonio architettonico: la modellazione BIM per la fabbrica Solimene"*, 2019.
- [13] A. Pavan, C. Mirarchi, A. Romano. *"I capitoli informativi con metodologia BIM. Guida alla stesura per appalti digitali."*, Tecniche Nuove, 2021.
- [14] M. Caputi, A. Pavan, A. Romano, D. Cavallo, *"Linee guida BIM per studi, imprese e committenti"*, Gruppo24Ore, 2022.
- [15] S. Pozzoli, P. R. Rossi, D. Longo, M. Gianninoto, *"Revit per Impianti MEP"*, Tecniche Nuove, 2020.
- [16] P. Farinati, C. Barutta, A. Versolato, *"Progettare per il PNRR: come costituire l'Ufficio BIM nella P.A. Costituzione, metodi e parametri per la verifica delle performance"*, Maggioli Editore, 2023.
- [17] A. Osello, *"Building Information Modelling Geographic Information System Augmented Reality per il Facility Management"*, Dario Flaccovio Editore, 2015.

[18] A. Marzi, *“Il sistema della viabilità in zona Lingotto”*, Strade& Autostrade, n°2 marzo aprile-2021, pp. 35 -40.

[19] RiSCAN PRO® Software Description & User's Instructions, 2019.

[20] M. Del Giudice, *“Il disegno e l'ingegnere. BIM handbook for building and civil engineering students”*, Libreria Editrice Universitaria Levrotto & Bella, Torino, 2019

[21] F. Foria, G. Miceli, *“Il MIRET, verso gallerie resilienti con la trasformazione digitale e la diagnostica integrate”*, Passaggi Sicuri, pp.73-80, 2021.

[22] M. Felli, C.Buratti, *“Lezioni di fisica tecnica 2”*, Morlacchi Editore, 2004.

## Sitografia

- [S1] [https://www.istat.it/it/files/2011/03/UAN0146354InformazioniN7\\_Infrastrutture\\_in\\_Italia.pdf](https://www.istat.it/it/files/2011/03/UAN0146354InformazioniN7_Infrastrutture_in_Italia.pdf)  
[visualizzato il 08/01/2024]
- [S2] <https://www.ansfisa.gov.it/-/sistemi-di-gestione-della-sicurezza-delle-infrastrutture-stradali-gestite-da-enti-locali-lavori-in-corso> [visualizzato il 09/01/2024]
- [S3] <https://provinceditalia.it/wp-content/uploads/2019/08/Dossier-Province-monitoraggio-ponti-2-.pdf> [visualizzato il 09/01/2024]
- [S4] <https://www.stradeanas.it/it> [visualizzato il 09/01/2024]
- [S5] <https://www.youtube.com/watch?v=GXVoHzhwSDw> [visualizzato il 09/01/2024]
- [S6] <https://www.ingenio-web.it/articoli/840-000-km-di-strade-2-179-gallerie-21-072-ponti-e-viadotti-che-conoscenza-abbiamo-del-livello-di-sicurezza/> [visualizzato il 09/01/2024]
- [S7] <https://www.youtube.com/watch?v=EKy3Ax1GKrQ> [visualizzato il 11/01/2024]
- [S8] <https://www.stradeeautostrade.it/pavimentazioni-e-manti/il-bim-per-la-gestione-manutentiva-delle-pavimentazioni-stradali/> [visualizzato il 9/12/2023]
- [S9] <https://ainop-test.mit.gov.it/portale#/> [visualizzato il 23/12/2023]
- [S10] [https://biblus.acca.it/infrastructure-asset-management-significato-usi-vantaggi/?\\_gl=1\\*1hhlsta\\*\\_ga\\*NTg5NjkyNjc0LjE3MDUzMzUzNjA.\\*\\_ga\\_K4Y50QD36K\\*MTcwNTMzNTM2MC4xLjEuMTcwNTMzNTYyOC4wLjAuMA..](https://biblus.acca.it/infrastructure-asset-management-significato-usi-vantaggi/?_gl=1*1hhlsta*_ga*NTg5NjkyNjc0LjE3MDUzMzUzNjA.*_ga_K4Y50QD36K*MTcwNTMzNTM2MC4xLjEuMTcwNTMzNTYyOC4wLjAuMA..) [visualizzato il 27/12/2023]
- [S11] <http://www.rilevamento.it/Didattica/Topografia%20A/2007-2008/Libro%20laser%20Vassena%20per%20web.pdf> [visualizzato il 30/12/2023]
- [S12] <https://www.ingenio-web.it/articoli/i-loi-nelle-scale-di-lod-usa-uk-ita/>  
[visualizzato il 02/01/2024]
- [S13] <https://biblus.acca.it/scan-to-bim-da-rilievo-laser-scanner-al-modello-bim> [visualizzato il 05/01/2024]
- [S14] <https://www.museotorino.it/view/s/ee9f2e79d59a41daa9b4c504804e4120> [visualizzato il 11/01/2024]
- [S15] <https://archiviodistatotorino.beniculturali.it/strumenti/archivio-storico-la-stampa/> (articolo del 20 marzo 1996 n.79 pagina 33). [visualizzato il 15/01/2024]
- [S16] [http://www.comune.torino.it/ucstampa/2022/article\\_591.shtml](http://www.comune.torino.it/ucstampa/2022/article_591.shtml) [visualizzato il 16/01/2024]
- [S17] <https://www.torinocambia.it/interventi/sottopasso-lingotto> [visualizzato il 25/01/2024]
- [S18] <https://www.lastampa.it/torino/2020/07/24/news/una-maxi-cupola-in-acciaio-di-700-tonnellate-per-la-prima-rotonda-sotterranea-d-italia-1.39118781#:~:text=Imperia%20Sanremo->

,Una%20maxi%20cupola%20in%20acciaio%20di%20700%20tonnellate,prima%20rotonda%20sotterranea%20d'Italia&text=TORINO.,%2C%20costata%204%2C4%20milioni. [visualizzato il 30/01/2024]

[S19] M. Gatti, "Sottopasso del Lingotto e A32, tornano i cantieri e le strade a singhiozzo" 14/02/2024 <https://www.rainews.it/tgr/piemonte/video/2024/02/torino-cantieri-sottopasso-lingotto-a32-179eb2ea-427a-40a4-999a-a3d20195bfda.html> [visualizzato il 02/02/2024]

[S20] <https://www.torinotoday.it/attualita/manutenzione-sottopasso-lingotto-progetto-secondo-lotto.html> [visualizzato il 04/02/2024]

[S21] <https://www.geodeticavolpe.com/prodotti/gps/topografici/leica-gps-viva-gs14> [visualizzato il 07/02/2024]

[S22] <https://www.geodeticavolpe.com/prodotti/stazioni-totali/leica-ts06> [visualizzato il 10/02/2024]

[S23] [http://labtopo.ing.unipg.it/files\\_sito/compiti/Geoide.pdf](http://labtopo.ing.unipg.it/files_sito/compiti/Geoide.pdf) [visualizzato il 12/02/2024]

[S24] [https://www.microgeo.it/wp-content/uploads/2021/07/RIEGL\\_VZ-400i\\_Datasheet\\_2019-11-22.pdf](https://www.microgeo.it/wp-content/uploads/2021/07/RIEGL_VZ-400i_Datasheet_2019-11-22.pdf) [visualizzato il 15/02/2024]

[S25] INGV, "Rapporti tecnici. Mounting calibration procedure to colorize point clouds of REIGL VZ-1000 using RiSCAN PRO® software", 2014, numero 267 <https://istituto.ingv.it/images/collane-editoriali/rapporti%20tecnici/rapporti-tecnici-2014/rapporto267.pdf> [visualizzato il 20/02/2024]

[S26] <https://static1.squarespace.com/static/5bd8bdcd17ba321ce9041f5/t/5ee29e29b74125267a236c4c/1591909937515/1.+Riegl+VZ+400+Work+Flow+and+Best+Practices+for+MANTIS.pdf> [visualizzato il 23/02/2024]

[S27] <https://www.cipaheritagedocumentation.org/wp-content/uploads/2018/11/Riegl-e.a.-Merging-and-processing-of-laser-scan-data-and-high-resolution-digital-images-acquired-with-a-hybrid-3D-laser-sensor.pdf> [visualizzato il 28/02/2024]

[S28] <http://www.rilevamento.it/Didattica/Topografia%20A/2007-2008/Libro%20laser%20Vassena%20per%20web.pdf> [visualizzato il 01/03/2024]

[S29] <http://www.riegl.com/> [visualizzato il 09/03/2024]

[S30] <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/514252/1/OR15057.pdf> [visualizzato il 15/03/2024]

## Ringraziamenti

Innanzitutto, vorrei ringraziare il Prof. Marco Piras che mi ha accompagnato e guidato con pazienza e disponibilità durante tutto il lavoro di tesi e la Prof.ssa Anna Osello che mi ha premesso di utilizzare il laboratorio “drawing TO the future”.

Un sincero ringraziamento va alla mia correlatrice l’Ing. Nives Grasso per la sua pazienza e suoi consigli e al correlatore Ing. Daniel Rodriguez Polania per il suo supporto.

Devo ringraziare il team del laboratorio di Geomatica e i dottorandi del laboratorio “drawing TO the future” che mi hanno incoraggiato e sostenuto durante la stesura della tesi.

Ringrazio mia madre, mio padre e mia nonna che mi hanno supportato psicologicamente ed economicamente, ed è merito loro se sono riuscito a portare a termine questo lungo percorso.

Ringrazio Leonardo e Davide che sono stati vicini in questi lunghi, e non sempre facili, anni al Politecnico.

Infine, vorrei estendere i miei sinceri ringraziamenti al mio amore Betül che con grande pazienza mi è stata vicina e mi ha supportato anche nei momenti difficili e mi ha incoraggiato fino all'ultimo giorno di questo percorso.