



Adeguamento funzionale della linea ferroviaria Roma-Ciampino con strumenti BIM

Functional adaptation of the Rome-Ciampino railway line with BIM tools

Damiano SANTI (*)
Giuseppe LOPRENCIPE

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.03.2025.ART.2>)

Sommario - Nel 2013 l'UE ha introdotto i corridoi TEN-T per una rete di trasporti integrata e sostenibile. L'opera analizzata rientra nel Corridoio Scandinavo-Mediterraneo, che collega nord e sud Europa.

L'adeguamento delle linee esistenti riguarda il peso assiale e la sagoma limite dei carri merci combinati, identificando interferenze dovute a opere civili, armamento, trazione elettrica e segnalamento.

L'uso della tecnologia BIM ottimizza rilievi e progettazione, garantendo un approccio efficiente e integrato all'ammodernamento dell'infrastruttura.

1. Introduzione

La linea oggetto dello studio è la Roma-Napoli via Cassino, una delle tre direttrici di collegamento tra Roma e Napoli attualmente in esercizio.

La classificazione di una linea in base al peso assiale viene identificata da una lettera ed un pedice, mentre per quanto riguarda i trasporti combinati la classificazione vede un codice alfanumerico che va ad individuare la grandezza massima consentita dall'ingombro della sagoma limite; si riportano a titolo di esempio la Tab. 1 e la Fig. 1.

Come riportato in Fig. 2 e Fig. 3 la linea è classificata come D₄ per quanto riguarda la categoria di peso assiale, consente già il passaggio dei treni merci più pesanti, mentre, essendo classificata come PC32 per la sagoma dei trasporti combinati, non consente il passaggio dei carri merci con codifica PC80, requisito fondamentale richiesto dal corridoio Scandinavo Mediterraneo.

Lo studio si è concentrato sulla galleria artificiale posta al Km 7+050, sopra alla quale poggiano i resti dell'Acquedotto Felice, che rappresenta un'interferenza geometrica per il transito dei treni merci con codifica PC80. Come appare evidente dalla cartolina riportata in Fig. 4, datata 1892, l'intersezione tra linea ferroviaria e l'Acquedotto Felice fu risolta operando una demolizione e ricostruzione della porzione di acquedotto interferente con la linea ferroviaria.

La ricostruzione di tale porzione di acquedotto vide la realizzazione di un'unica grande arcata che andò ad alterare l'orditura delle pile della parte storica realizzata nel

Summary - In 2013, the EU introduced TEN-T corridors for an integrated and sustainable transport network. The work analysed falls within the Scandinavian-Mediterranean Corridor, which connects northern and southern Europe.

The adaptation of the existing lines concerns the axial weight and the limit gauge of the freight wagons for combined transport, identifying interference due to civil works, permanent way, electrical traction and signalling.

The use of BIM technology optimises surveys and design, ensuring an efficient and integrated approach to infrastructure modernisation.

1. Introduction

The object of the study is the Rome-Naples line via Cassino, one of the three connecting routes between Rome and Naples currently in operation.

The classification of a line based on axial weight is identified by a letter and a subscript, while with regard to combined transport the classification sees an alphanumeric code that identifies the maximum size allowed by the size of the limit gauge; Tab. 1 and Fig. 1 are given by way of example.

As shown in Fig. 2 and Fig. 3, the line is classified as D₄ with regard to the axial weight category, it already allows the transit of the heaviest freight trains, while, being classified as PC32 for the combined transport gauge, it does not allow the transit of freight wagons with PC80 coding, a fundamental requirement required by the Scandinavian Mediterranean corridor.

The study focused on the artificial tunnel located at Km 7.050, on which the remains of the Felice Aqueduct rest, which represents a geometric interference for the transit of freight trains with PC80 coding.

As is evident from the postcard shown in Fig. 4, dated 1892, the intersection between the railway line and the Felice Aqueduct was solved by demolishing and reconstructing the portion of the aqueduct interfering with the railway line.

The reconstruction of this portion of the aqueduct saw the construction of a single large arch that altered the frame of the piers of the historical part built in 1585 by Pope Sixtus V according to the project of Giovanni Fontana.

Another work of considerable interest on the same in-

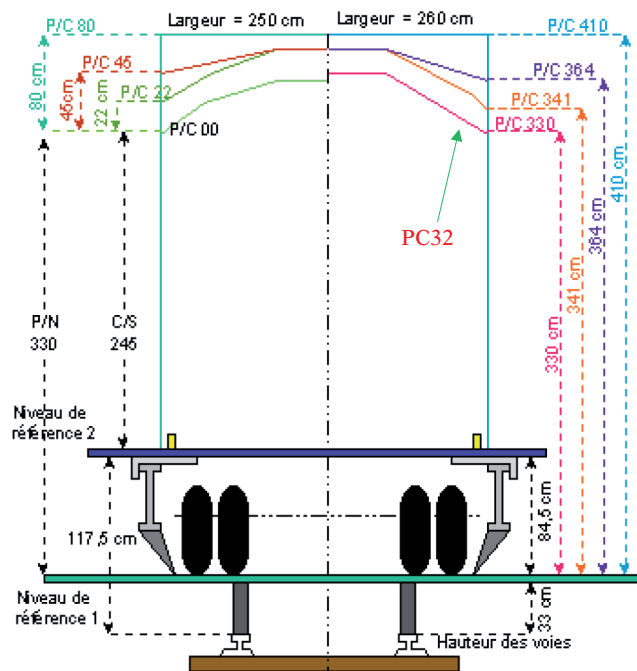


Figura 1 - Sagoma limite PC [2].
Figure 1 - PC loading gauge [2].

Tabella 1 – Table 1

Classificazione delle linee in base alla massa [1]
Classification of lines by mass [1]

Categoria (1) Category (1)	Massa per asse Axle load	Massa per metro corrente Weight-to-length ratio
A	16 t	5,0 t/m
B ₁	18 t	5,0 t/m
B ₂	18 t	6,4 t/m
C ₂	20 t (2)	6,4 t/m
C ₃	20 t (2)	7,2 t/m
C ₄	20 t (2)	8,0 t/m
D ₂	22,5 t	6,4 t/m
D ₃	22,5 t	7,2 t/m
D ₄	22,5 t	8,0 t/m
E ₃	25,0 t	8,8 t/m

tersection was carried out during the programme contract between the years 91-92, signed by the Government and State Railways which provided for the quadrupling of the Rome-Casilina-Ciampino line section.

However, the project was not completed due to import-

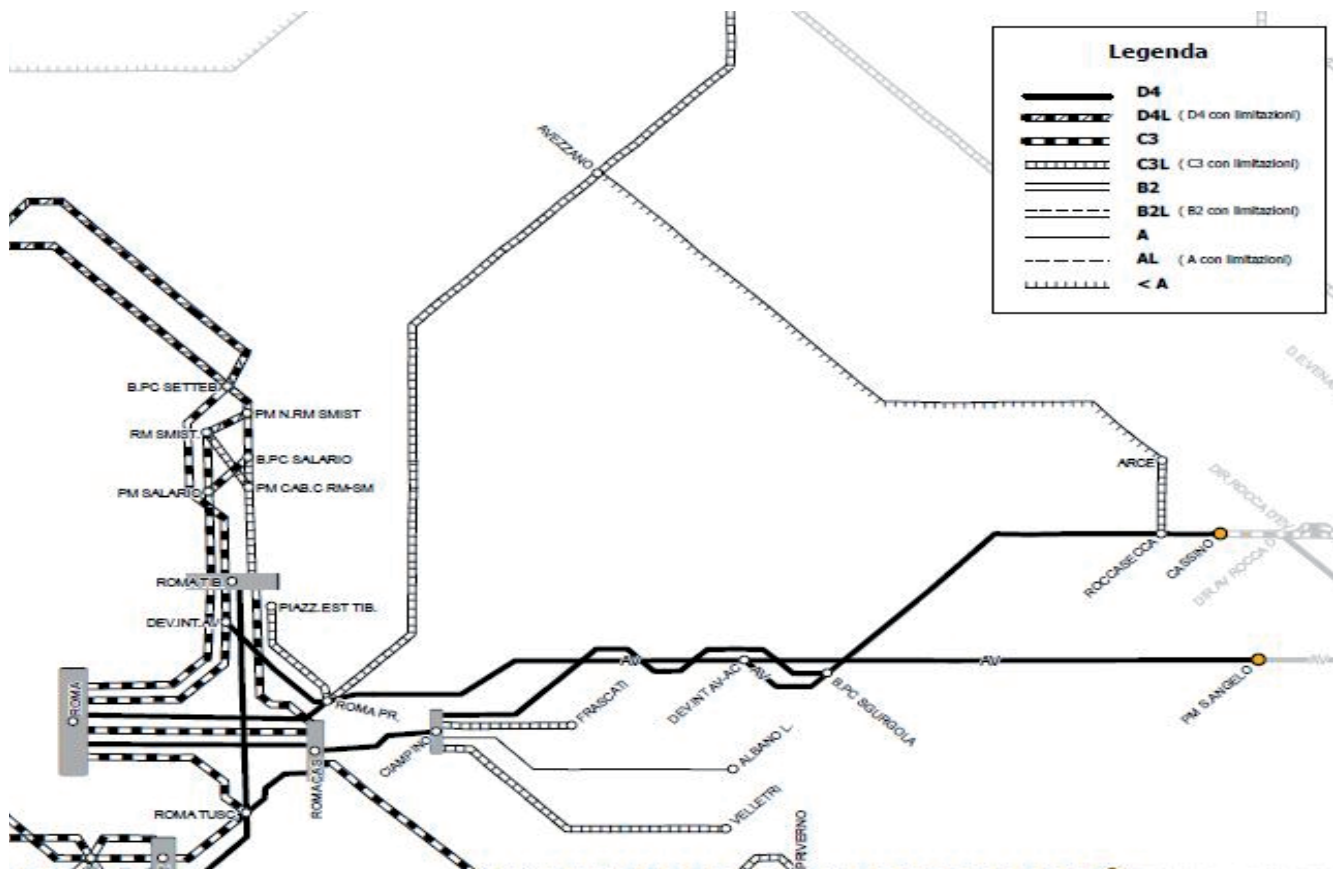


Figura 2 - Codifica linea Cassino per massa [3].
Figure 2 - Cassino line coding by mass [3].

Arroviaria Nazionale codificate per il traffico combinato I e dei SEMIRIMORCHI con codifica a due cifre

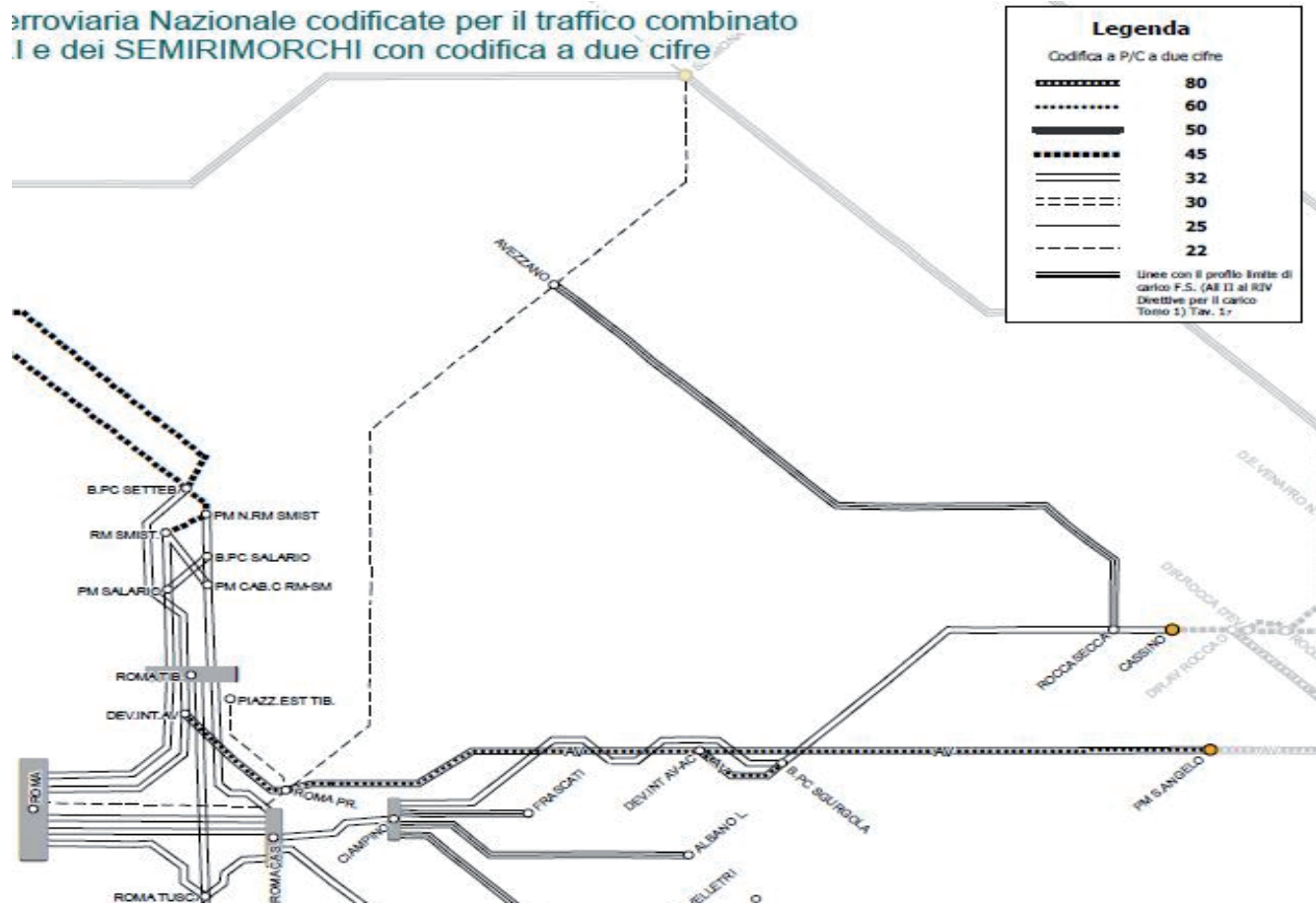


Figura 3 - Codifica linea Cassino per trasporto combinato [3].
Figure 3 - Cassino line coding for combined transport [3].

1585 ad opera di Papa Sisto V sul progetto di Giovanni Fontana.

Un altro intervento di notevole interesse sulla stessa intersezione, fu eseguito durante il contratto di programma tra gli anni 91-92, sottoscritto da Governo e F.S. che prevedeva il quadruplicamento del tratto di linea Roma Casilina-Ciampino. Tuttavia, il progetto non fu completato a causa di importanti rinvenimenti archeologici, che richiesero una revisione e un approfondimento del progetto.

Nella Fig. 5 è illustrato il taglio delle pile dell'Acquedotto per la realizzazione delle opere infrastrutturali a servizio della nuova linea.

L'intervento qui proposto, che dovrà essere esaminato da tutti gli enti interessati, non interferirà con i reperti archeologici, a differenza dei lavori previsti per il quadruplicamento della tratta Roma Casilina-Ciampino.

ant archaeological finds, which required a review and in-depth study of the project.

Fig. 5 illustrates the cutting of the piers of the Aqueduct



Figura 4 - Primo intervento Acquedotto Felice.
Figure 4 - First task on the Felice Aqueduct.

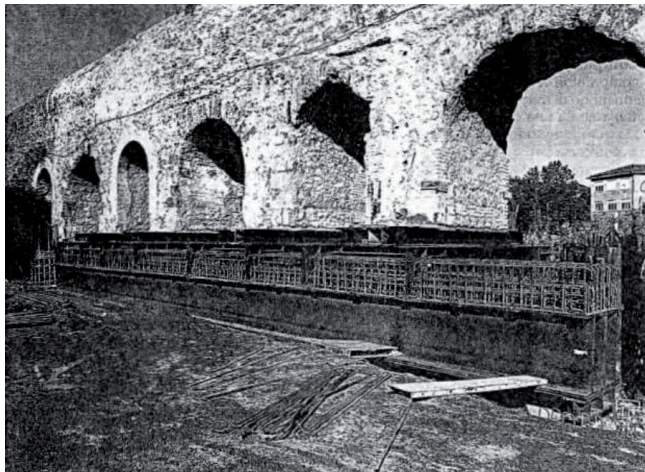


Figura 5 Taglio delle pile [4].
Figure 5 Cutting of the piers [4].

2. Planimetrie e sezioni tipo

A seguito dei rilievi condotti dagli ingegneri di R.F.I. nel novembre 2021, è stato possibile ricavare la plano-altimetria della galleria. L'opera ha una lunghezza di 26 m, con un andamento altimetrico pressoché costante, passando dai 48.769m di quota s.l.m. dell'imbocco lato Roma, ai 48.872m di quota s.l.m. dell'imbocco lato Cassino. L'andamento planimetrico è rettilineo, il che non solo facilita la progettazione di un eventuale intervento da un punto di vista computazionale, ma semplifica anche tutte le fasi successive. Di seguito, Fig. 6, la sezione tipologica dell'imbocco lato Roma.

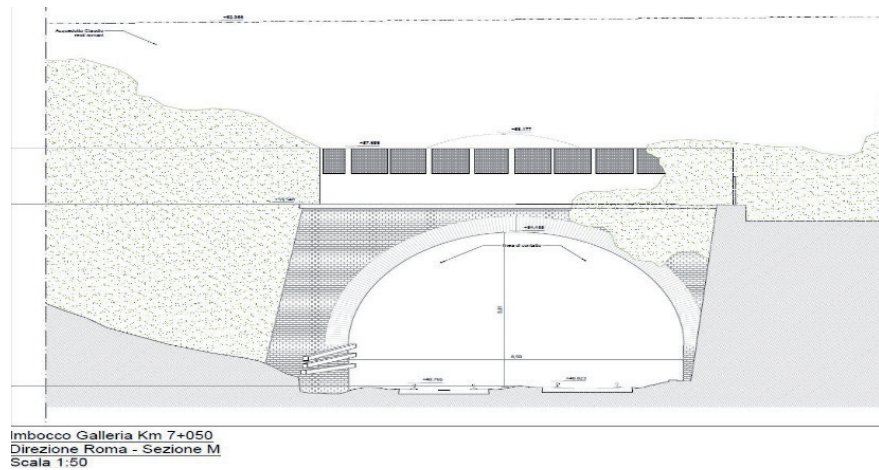


Figura 6 - Sezione tipo Galleria imbocco Roma.
Figure 6 - Rome entrance Gallery standard section.

3. Interferenze

Dopo i rilievi, è stato possibile calcolare le interferenze che ostacolano il passaggio dei treni merci con codifica PC80. Nella Fig. 7 si può notare quale sia la parte di sagoma interessata dal problema. Nella Tab. 2 è riportato un tabulato esplicativo in cui vengono confrontate le sezioni ottenute mediante rilievi in loco con la sagoma dei treni in questione:

Nel capitolo seguente verrà introdotto un nuovo approccio basato sull'uso di programmi BIM per la rilevazione delle interferenze.

Al fine di valutare l'affidabilità del procedimento proposto, è stato effettuato un confronto tra i risultati otte-

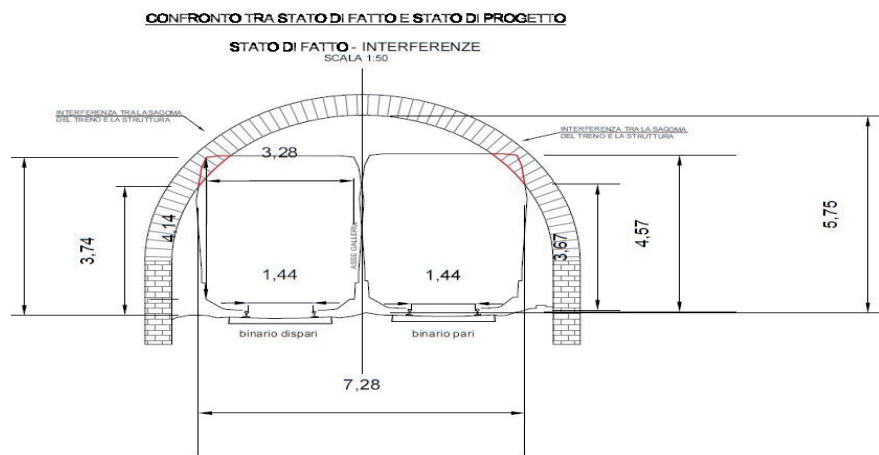


Figura 7 - Interferenza galleria Km 7+050.
Figure 7 - Tunnel interference Km 7,050.

for the implementation of the infrastructure works to the benefit of the new line.

The work proposed here, which must be examined by all interested bodies, will not interfere with the archaeological finds, unlike the work planned for the quadrupling of the Rome-Casilina-Ciampino section.

2. Plans and standard sections

Following the surveys carried out by R.F.I. engineers in November 2021, the plano-altimetry of the tunnel was obtained.

The work is 26 m long, with an almost constant altimetric trend, going from 48,769 m above sea level at the Rome side entrance, to 48,872 m above sea level at the Cassino side entrance.

The planimetric trend is straight, which not only facilitates the design of any task from a computational point of view but also simplifies all the subsequent phases.

Below, in Fig. 6, the typological section of the Rome side entrance.

nuti con il metodo BIM e quelli ottenuti dagli ingegneri di R.F.I. attraverso i rilievi con laser scanner e ricostruzione sul CAD, per poi procedere alla progettazione di un intervento risolutivo.

4. Rilievi con strumentazione BIM

4.1. Il programma per il rilievo e ricostruzione virtuale dell'opera

Il Building Information Modeling (BIM) è un metodo per ottimizzare la pianificazione, realizzazione e progettazione di costruzioni mediante l'uso di un software. Attraverso il BIM, tutti i dati rilevanti di una costruzione possono essere raccolti e combinati digitalmente consentendo la visualizzazione virtuale della costruzione come modello geometrico tridimensionale. Il programma utilizzato, permette di ricreare digitalmente opere civili utilizzando la tecnologia BIM a partire da rilievi fotografici. La procedura operativa prevede i seguenti passaggi:

- Rilievi in loco tramite drone;
- Caricamento di foto o video nel programma;
- Ricostruzione preliminare e configurazione delle impostazioni;
- Ricostruzione definitiva.

4.1.1. Rilievi in loco tramite drone

I rilievi sono stati effettuati con un drone di fascia media (Fig. 8), dotato di una telecamera in grado di registrare video in 4K e trasferirli immediatamente a uno smartphone.

È fondamentale che il drone non incontri ostacoli durante il volo e che sia sempre mantenuto il contatto visivo con esso.

Durante la ripresa, è importante acquisire immagini da diverse altezze e angolazioni per evitare zone d'ombra nella ricostruzione.

Sono stati eseguiti più test in giorni differenti per ottenere un risultato ottimale, sfruttando in particolare le foto nadirali.

L'utilizzo di foto nadirali, come mostrato nella Fig. 9, è essenziale per permettere al programma di individuare punti di controllo e ricostruire l'opera a 360 gradi.

4.1.2. Ricostruzione preliminare

Caricate le foto nel programma, è possibile settare le impostazioni per determinare la scala utilizzando due

3. Interferences

After the surveys, the interferences that hinder the passage of freight trains with PC80 loading gauge could be calculated. Fig. 7 shows the part of the gauge affected by the problem.

Tab. 2 shows an explanatory table in which the sections obtained by on-site surveys are compared with the gauge of the trains in question:

A new approach will be introduced in the following chapter, based on the use of BIM software for the detection of interferences.

In order to evaluate the reliability of the proposed procedure, a comparison was made between the results obtained with the BIM method and those obtained by R.F.I. engineers through laser scanner surveys and reconstruction on the CAD, and then proceed with the design of a resolution work.

Tabella 2 – Table 2

Interferenza galleria Km 7+050
Gallery interference Km 7.050

INTERFERENZA SAGOMA LIMITE PC80 PC80 LIMIT GAUGE INTERFERENCE						
H Galleria H Gallery	H richiesta H required	L Galleria L Gallery	L richiesta L required	Interferenza Interference	ΔH	ΔL
3.67 m	4.57 m	5.83 m	7.28 m	SI YES	0.9 m	1.45 m



Figura 8 - Drone utilizzato per i rilievi fotografici.
Figure 8 - Drone used for photo surveys.



Figura 9 - Foto nadirale drone.
Figure 9 - Drone nadir photo.

punti di controllo su foto consecutive e una lunghezza nota.

Nel caso in esame, è stato impostato come punto di controllo lo scartamento dei binari, che nell'infrastruttura italiana è di 1435 mm.

Queste operazioni non sono necessarie se si utilizza la georeferenziazione automatica delle foto, che è integrata in molte fotocamere.

Nel caso studio, si è preferito utilizzare foto con metadati geolocalizzati dal drone, impostando il sistema di coordinate WGS 84 (EPSG:4326).

Dopo aver settato il sistema di coordinate, si procede con l'aerotriangolazione, che genera un modello preliminare della struttura, offrendo la possibilità di selezionare l'area da ricostruire in base alla capacità di calcolo dell'elaboratore.

4.1.3. Ricostruzione definitiva

Il primo passo per la ricostruzione definitiva è definire lo "spatial framework". Questo consente di delimitare l'area dell'opera da replicare modificando gli spazi definiti dai pannelli gialli, come mostrato in Fig. 10.

È importante prestare attenzione alle risorse di calcolo richieste, poiché impostazioni errate nella definizione della RAM da utilizzare, potrebbero compromettere la ricostruzione. Se la potenza di calcolo disponibile non è sufficiente, è possibile utilizzare più elaboratori collegati tra loro, come motori che lavorano in parallelo. La ricostruzione di modelli di grandi opere o di intere città può richiedere centinaia di gigabyte di RAM. Una volta definiti questi parametri, si avvia la ricostruzione definitiva. Per l'opera in questione è stato utilizzato un calcolatore con 24 Gb di Ram. Il risultato ottenuto viene visualizzato nel programma: Nella Fig. 11 si mostra l'imbocco lato Roma:

La qualità della ricostruzione dipende dalla qualità del drone utilizzato: droni più professionali garantiranno una

4. Surveys with BIM instrumentation

4.1. Software for the virtual survey and reconstruction of the work

Building Information Modelling (BIM) is a method to optimise the planning, construction and design of buildings through the use of software.

Through BIM, all the relevant data of a construction can be collected and combined digitally allowing the virtual visualisation of the construction as a three-dimensional geometric model.

The software used allows to digitally recreate civil works using BIM technology starting from photographic surveys.

The operating procedure includes the

following steps:

- *On-site drone surveys;*
- *Uploading photos or videos to the software;*
- *Preliminary reconstruction and configuration of settings;*
- *Final reconstruction.*

4.1.1. On-site drone surveys

The surveys were carried out with a mid-range drone (Fig. 8), equipped with a camera capable of recording 4K videos and transferring them immediately to a smartphone.

It is essential that the drone does not encounter obstacles during the flight and that visual contact is always maintained with it.

During the shooting, it is important to acquire images from different heights and angles to avoid shadow areas in the reconstruction.

Multiple tests were carried out on different days to obtain an optimal result, particularly exploiting the nadir photos.

The use of nadir photos, as shown in Fig. 9, is essential to allow the software to identify control points and reconstruct the work at 360 degrees.

4.1.2. Preliminary reconstruction

After loading the photos in the software, the settings to determine the scale using two control points on consecutive photos and a known length can be introduced.

In this case, the track gauge was set as the control point, which in the Italian infrastructure is 1435 mm.

These operations are unnecessary if automatic photo georeferencing is used, which is integrated into many cameras.

In the case study, it was preferred to use photos with metadata geolocated by the drone, setting the WGS 84 coordinate system (EPSG:4326).

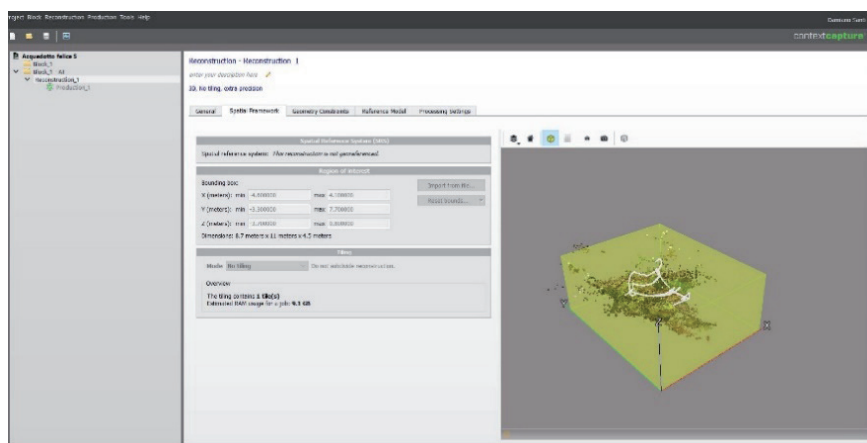


Figura 10 - Definizione dello spatial framework.
 Figure 10 - Definition of the spatial framework.



Figura 11 - Mash 3D, imbocco lato Roma.
 Figure 11 - 3D mash, Rome side entrance.

maggiore precisione nella ricostruzione. Le dimensioni ricavate dal modello possono essere utilizzate per confrontare la sagoma limite PC80 con le misurazioni reali. Si riporta, nella Fig. 12, come esempio il calcolo effettuato sull'altezza della galleria.

Di seguito si riporta in Tab. 3 di confronto tra le mi-

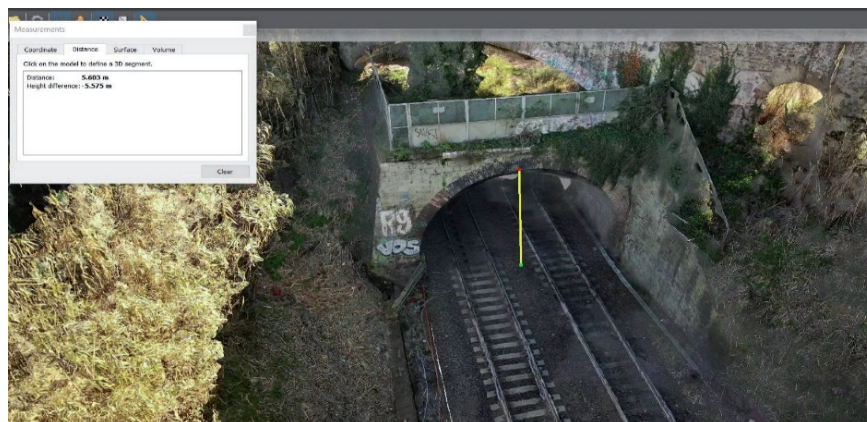


Figura 12 - Mash 3D, misurazione altezza galleria.
 Figure 12 - 3D mash, tunnel height measurement.

After setting up the coordinate system, the air triangulation is carried out, which generates a preliminary model of the structure, offering the possibility of selecting the area to be reconstructed based on the computer's calculation capacity.

4.1.3 Final reconstruction

The first step for the final reconstruction is to define the "spatial framework".

This allows defining the area of the work to repeat by modifying the spaces defined by the yellow panels, as shown in Fig. 10.

It is important to pay attention to the required computing resources, since incorrect settings in the definition of the RAM to be used could compromise the reconstruction.

If the available computing power is insufficient, multiple computers connected to each other, can be used, such as engines that work in parallel.

The reconstruction of models of large works or entire cities may require hundreds of gigabytes of RAM.

Once these parameters are defined, the final reconstruction begins.

For the work in question, a calculator with 24 Gb of RAM was used.

The result obtained is displayed in

the software:

Fig. 11 shows the entrance on the Rome side:

The quality of the reconstruction depends on the quality of the drone used: more professional drones will guarantee greater precision in the reconstruction.

The dimensions obtained from the model can be used to compare the PC80 limit gauge with the actual measurements.

As an example, the calculation made on the height of the tunnel is shown in Fig. 12.

Below in Tab. 3 comparing the measurements obtained by a three-dimensional survey and those taken manually using a laser scanner.

The error detected is of the order of a decimetre, proving that this methodology can be used for preliminary analyses without the need for surveys carried out with specific instrumentation.

surazioni ricavate tramite rilievo tridimensionale e quelle rilevate manualmente mediante laser scanner.

Tabella 3 – Table 3

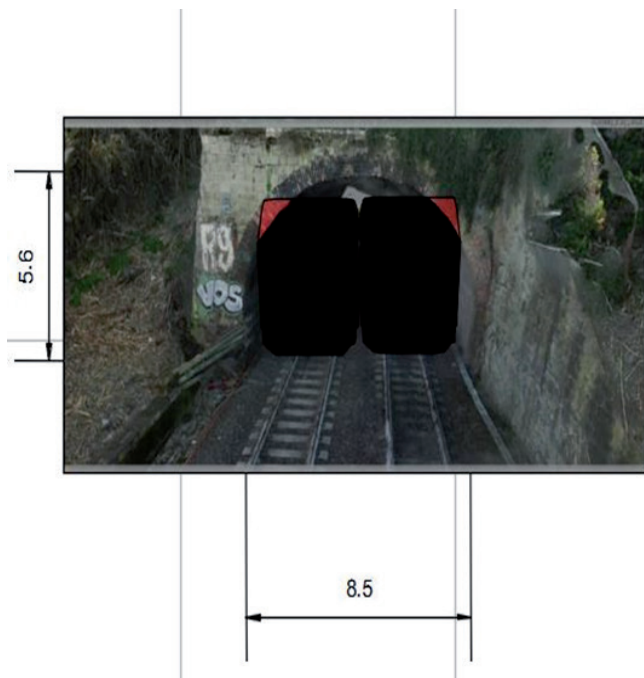
Confronto BIM e rilievi
BIM comparison and surveys

	Scartamento Gauge	H Galleria H Gallery	L Galleria L Gallery
ContexC	1422 mm	5600 mm	8335 mm
Rilievi Surveys	1435 mm	5750 mm	8500 mm
Errore Error	0.9%	2.6%	1.9%

L'errore rilevato è dell'ordine del decimetro, dimostrando che questa metodologia può essere utilizzata per analisi preliminari senza necessità di rilievi effettuati con strumentazione specifica.

Inoltre, i file generati dal software BIM possono essere esportati in formato DWG per ulteriori verifiche. In questo caso, è stato sovrapposto il profilo della sagoma limite PC80 dei carri merci all'immagine della galleria ottenuta dal programma, ottenendo un risultato comparabile a quello dei file DWG derivati da rilievi con laser scanner, come illustrato in Fig. 13.

La differenza di quota per il passaggio dei treni merci con sagoma limite PC/80 rispetto all'intradosso è di circa 90 cm. Di seguito vengono analizzate le possibili scelte progettuali necessarie per risolvere questa interferenza. Le alternative principali sono tre:



In addition, the files generated by the BIM software can be exported in DWG format for further verification. In this case, the profile of the PC80 limit gauge of the freight wagons was superimposed on the gallery image obtained by the software, obtaining a result comparable to that of the DWG files derived from laser scanner surveys, as shown in Fig. 13.

The difference in height for the transit of freight trains with PC/80 limit gauge with respect to the intrados is about 90 cm.

The possible design choices necessary to solve this interference are analysed below. There are three main alternatives:

- Lowering of the upper surface of the rail;
- Modification of the railway track;
- Task on the Felice Aqueduct.

The first solution is based on the 90 cm difference in height highlighted by the surveys and is the easiest option to implement, since it involves works on an existing infrastructure. However, it has some critical issues, including the need to schedule train service interruptions and the consequent impact on the operation and regularity of train circulation.

However, while representing a theoretically viable option, the second solution requires a more complex and expensive design, in addition to an in-depth analysis.

Modifying the route in the Rome Casilina-Ciampino section, a highly anthropized and densely populated area as shown in Fig. 14, would entail considerable difficulties.

In addition, the implementation times of a project of

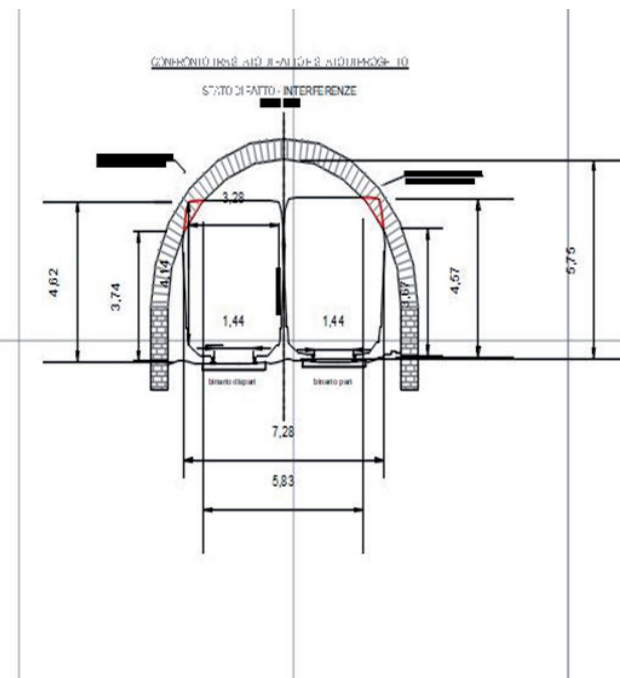


Figura 13 - Confronto BIM e rilievi.
Figure 13 - BIM comparison and surveys.

- Abbassamento del piano del ferro;
- Modifica del tracciato ferroviario;
- Intervento sull'Acquedotto Felice.

La prima soluzione si basa sulla differenza di quota di 90 cm evidenziata dai rilievi e rappresenta l'opzione più semplice da implementare, poiché prevede interventi su un'infrastruttura esistente. Tuttavia, presenta alcune criticità, tra cui la necessità di programmare interruzioni del servizio ferroviario e il conseguente impatto sull'operatività e la regolarità della circolazione dei treni.

Pur rappresentando un'opzione teoricamente praticabile, la seconda soluzione richiede una progettazione più complessa e costosa, oltre a un'analisi approfondita.

Modificare il percorso nella tratta Roma Casilina-Ciampino, un'area altamente antropizzata e densamente popolata come mostrato in Fig. 14, comporterebbe notevoli difficoltà.

Inoltre, i tempi di realizzazione di un progetto di tale portata sarebbero incompatibili con la scadenza del 2030 fissata per il completamento dei corridoi TEN-T.

La presenza di manufatti storici nella zona, che ha già impedito in passato il quadruplicamento della linea, rappresenta un ulteriore ostacolo a questa soluzione.

Intervenire direttamente sull'Acquedotto Felice presenta vincoli ancora più stringenti, a causa dei vincoli di

such magnitude would be incompatible with the 2030 deadline set for the completion of the TEN-T corridors.

The presence of historical artefacts in the area, which has already prevented the quadrupling of the line in the past, represents a further obstacle to this solution.

Intervening directly on the Felice Aqueduct presents even more stringent constraints, due to the restrictions of an archaeological, landscape and cultural heritage nature of the artefact.

The time necessary to coordinate with the Ministry of Cultural Heritage and other relevant bodies, together with the complexity of the design and implementation of an adequate work, make this option impractical.

In addition, the delicacy of the historical structure imposes further restrictions on possible tasks.

In light of the above considerations, the most appropriate choice is to lower the upper surface of the rail by 90 cm.

This type of task requires particular attention to the technical constraints imposed by the R.F.I. permanent way design Manual, in particular with regard to the minimum radii of the vertical curves, the lengths of the sloping grade stakes and the overall geometry of the route.

The work will be designed following the 360-degree approach used in similar cases by R.F.I., which provides not only for the lowering of the upper surface of the rail, but also

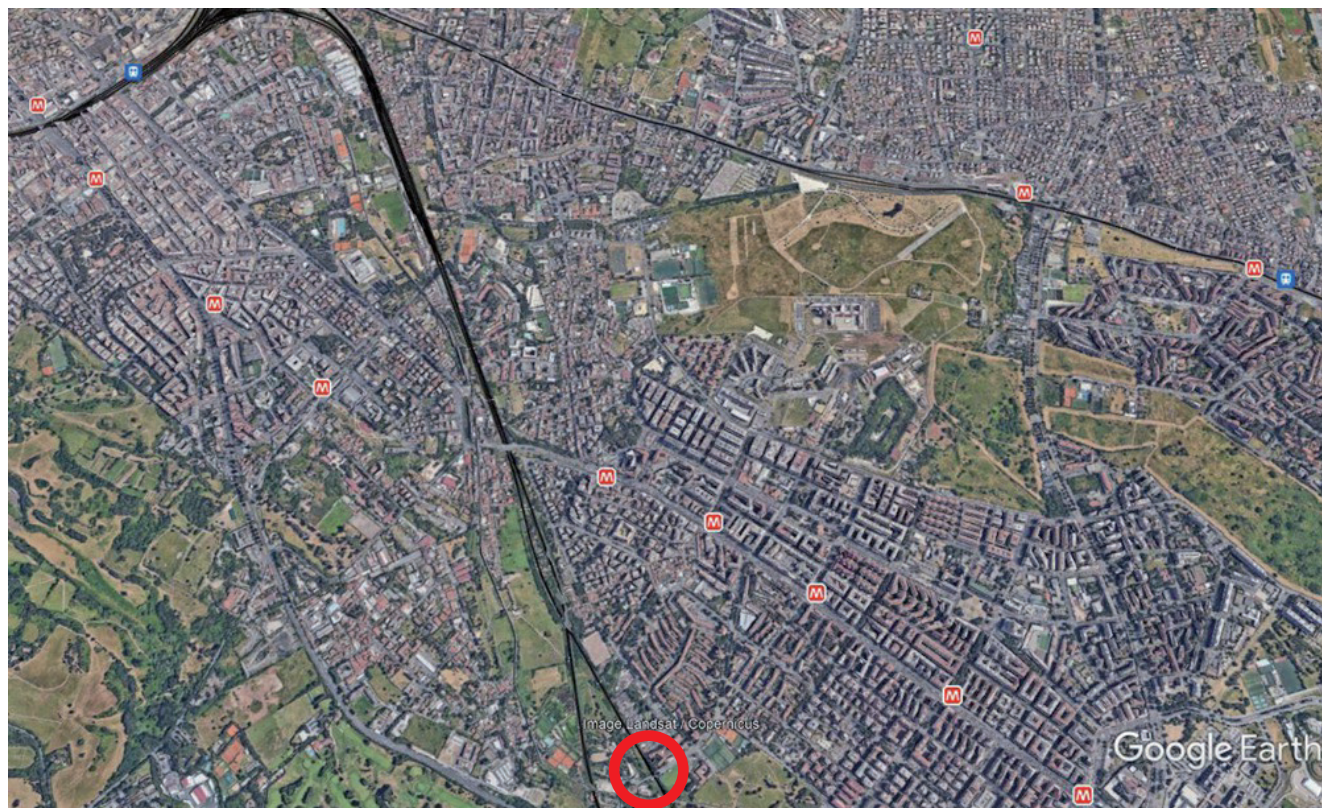


Figura 14 - Linea ferroviaria Roma Casilina Cassino, immagine da Google Earth.
Figure 14 - Rome Casilina Cassino railway line, image from Google Earth.

natura archeologica, paesaggistica e di bene culturale del manufatto.

I tempi necessari per coordinarsi con il Ministero dei Beni Culturali e altri enti preposti, unitamente alla complessità della progettazione e della realizzazione di un intervento adeguato, rendono questa opzione poco praticabile. Inoltre, la delicatezza della struttura storica impone ulteriori restrizioni sui possibili interventi. Alla luce delle considerazioni sopra esposte, la scelta più opportuna è quella dell'abbassamento del piano del ferro di 90 cm.

Questo tipo di intervento richiede particolare attenzione ai vincoli tecnici imposti dal Manuale di progettazione armamento di R.F.I., in particolare riguardo ai raggi minimi delle curve verticali, alle lunghezze delle livellette in pendenza e alla geometria complessiva del tracciato.

L'intervento verrà progettato seguendo l'approccio a 360 gradi utilizzato in casi simili da R.F.I., che prevede non solo l'abbassamento del piano del ferro, ma anche la risoluzione di problematiche di natura idraulica e statica all'interno della galleria situata al Km 7+050.

Il progetto includerà le seguenti fasi operative:

- Realizzazione di micropali con cordoli di collegamento per migliorare la stabilità strutturale
- Impermeabilizzazione della galleria;
- Abbassamento del piano del ferro.

Questo intervento permetterà di risolvere l'interferenza in modo efficiente, rispettando le normative tecniche e tutelando il patrimonio archeologico e culturale presente nella zona.

5. Progettazione con strumenti BIM

5.1. Il programma BIM

Il software impiegato per l'intervento selezionato supporta la tecnologia BIM (Building Information Modeling), permettendo di sviluppare modelli completi che integrano tutte le componenti necessarie: dal terreno alle opere civili, fino ai profili e alle reality mesh.

Come per le fasi di ricostruzione, anche in questo caso il processo segue una serie di passaggi strutturati:

- Importazione del terreno;
- Definizione del profilo 3D della linea ferroviaria;
- Definizione del nuovo profilo;
- Modellazione della sede ferroviaria e delle opere civili;
- Realizzazione delle sezioni trasversali.

5.1.1. Importazione della geometria del terreno

Il terreno può essere importato utilizzando i file forniti dalla Regione Lazio, disponibili sul portale Geoportale Lazio. Dopo l'importazione, è necessario eseguire migliorie per aumentare la precisione dei dati tridimensionali, rendendo così la successiva modellazione quanto più fedele

for the solution of problems of a hydraulic and static nature within the tunnel located at Km 7.050.

The project will include the following operational phases:

- Realisation of micro-piers with connecting curbs to improve structural stability
- Waterproofing of the tunnel;
- Lowering of the upper surface of the rail.

This work will allow the interference to be resolved efficiently, respecting technical regulations and protecting the archaeological and cultural heritage present in the area.

5. Design with BIM tools

5.1. The BIM software

The software used for the work chosen supports BIM (Building Information Modelling) technology, allowing the development of complete models that integrate all the necessary components: from the land to civil works, up to profiles and reality meshes.

As for the reconstruction phases, in this case also the process follows a number of structured steps:

- Import of terrain;
- Definition of the 3D profile of the railway line;
- Definition of the new profile;
- Modelling of the track bed and civil works;
- Construction of cross sections.

5.1.1. Import of terrain geometry

The terrain can be imported using the files provided by the Lazio Region, available on the Lazio Geoportal.

After import, improvements must be made to increase the accuracy of the three-dimensional data, thus making the subsequent modelling as faithful as possible to reality.

To facilitate the work, a geographical coordinates system can be set up in the software.

In this case, the UTM-WGS 1984 datum system was chosen, Zone 33 North, with units in metres and a central meridian at 15° E, which covers the study area. This step is essential to correctly use the geolocated reality mesh, and to simplify the definition of the railway profile.

The result obtained is that in Fig. 15:

In the project under review, an attempt was made to import the 3D mesh generated with the reconstruction software previously used, using the "reality mesh" command for the references. As expected, the use of a non-professional drone has reduced accuracy, not only in photographic processing, however acceptable, but also in the geolocation of images. As a result, the 3D mesh was slightly offset from the actual coordinates of the work, making it unsuitable for direct use in modelling.

possibile alla realtà. Per facilitare il lavoro è possibile impostare un sistema di coordinate geografiche nel programma. In questo caso, è stato scelto il sistema UTM-WGS 1984 datum, Zona 33 Nord, con unità in metri e meridiano centrale a 15° E, che copre l'area di studio. Questo passaggio è fondamentale per utilizzare correttamente le reality mesh geolocalizzate, e per semplificare la definizione del profilo ferroviario. Il risultato ottenuto è quello in Fig. 15:

Nel progetto in esame, si è tentato di importare la mesh 3D generata con il software di ricostruzione precedentemente utilizzato, impiegando il comando "reality mesh" per i riferimenti. Come previsto, l'uso di un drone non professionale ha ridotto la precisione, non solo nell'elaborazione fotografica, comunque accettabile, ma anche nella geolocalizzazione delle immagini. Di conseguenza, la mesh 3D risultava leggermente sfalsata rispetto alle coordinate reali dell'opera, rendendola inadatta a un impiego diretto nella modellazione. Tuttavia, questo caso offre l'opportunità di valutare i vantaggi e i limiti di tali metodi.

5.1.2. Definizione del profilo 3D di tracciato della linea ferroviaria esistente

Per la definizione del profilo, ci si è posizionati lungo l'asse dei binari, sia dispari che pari, considerando che l'andamento planimetrico della linea è quasi rettilineo. Grazie alle plano-altimetrie fornite da R.F.I., si è potuto integrare il profilo con dati corretti relativi all'altitudine, ordinandolo in funzione delle progressive chilometriche della linea ferroviaria.

Si è poi scelto di prendere in considerazione il profilo del binario dispari, poiché è il più critico dal punto di vista geometrico. Per risolvere le interferenze rilevate nella galleria situata tra il Km 7+050 e il Km 7+076, è stato deciso di abbassare il piano del ferro di 90 cm.

5.1.3. Definizione del nuovo profilo

La progettazione si è svolta in più fasi. Dopo aver fatto

However, this case offers the opportunity to evaluate the advantages and limitations of these methods.

5.1.2. Definition of the 3D layout profile of the existing railway line

For the definition of the profile, we positioned ourselves along the axis of the tracks, both down and up line, considering that the planimetric trend of the line is almost straight. Thanks to the plano-altitudes provided by R.F.I., the profile was integrated with correct altitude data, organising it according to the progressive kilometres of the railway line.

It was then chosen to take into account the profile of the down line, since it is the most critical from the geometric point of view. To resolve the interference detected in the tunnel located between Km 7.050 and Km 7.076, it was decided to lower the upper surface of the rail by 90 cm.

5.1.3. Definition of the new profile

The design was carried out in several phases. After making an offset of 90 cm downwards with respect to the existing profile, the starting points for the vertical transitions which connect the new elevation with the existing one had to be identified.

- *Cassino side connection: it was decided to start the connection at Km 7.101, that is 25 m after the end of the tunnel, thus guaranteeing sufficient space for the passage of a complete wagon and an adequate safety margin.*
- *Rome side connection: here there are no particular constraints; therefore, greater freedom of choice has been left. It was preferred to lower the upper surface of the rail before the start of the overpass located at Km 6.950, positioning the starting point of the connection at Km 6.928.*

Once the points have been identified, the constant-radius curves are introduced.

Two constant-radius curves have been inserted in each

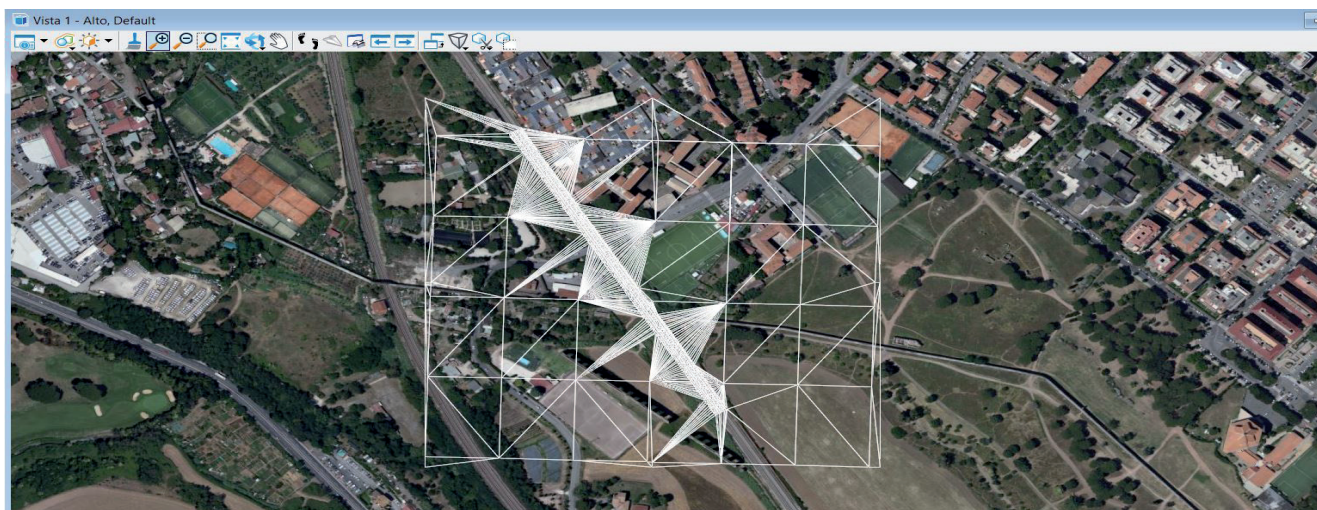


Figura 15 - Vista aerea nel software.
Figure 15 - Aerial view in the software.

un offset di 90 cm verso il basso rispetto al profilo esistente, è stato necessario individuare i punti di inizio per i raccordi verticali, che collegano la nuova quota con quella esistente.

- Raccordo lato Cassino: si è scelto di iniziare il raccordo al Km 7+101, ossia 25 m dopo la fine della galleria, garantendo così spazio sufficiente per il passaggio di un carro completo e un margine di sicurezza adeguato.
- Raccordo lato Roma: qui non ci sono vincoli particolari; quindi, è stata lasciata maggiore libertà di scelta. Si è preferito abbassare il piano del ferro prima dell'inizio del cavalcavia situato al Km 6+950, posizionando il punto di inizio del raccordo al Km 6+928.

Una volta individuati i punti si procede con l'inserimento delle curve circolari.

Per controllare i raggi di curvatura, sono state inserite due curve circolari in ciascun raccordo, nel rispetto delle normative. In particolare, il manuale di progettazione armamento di R.F.I., al capitolo II.3.14, riporta la Tab. 4 con le verifiche da eseguire per assicurarsi che i raggi e le curve rispettino i requisiti di progetto. Questi passaggi garantiscono una soluzione tecnica ottimale per l'abbassamento del piano del ferro, rispettando al contempo i vincoli geometrici e normativi necessari per l'infrastruttura ferroviaria.

Per determinare la velocità massima consentita sulla linea Roma Casilina-Cassino, è utile fare riferimento al fascicolo linea riportato in Fig. 16, che fornisce i dettagli specifici in base al rango dei treni che la percorrono. Dato che questa linea è a traffico misto, con la presenza sia di treni passeggeri che merci, sarà opportuno considerare il rango più alto, ovvero quello destinato ai treni passeggeri ad alta velocità o ai treni più performanti.

Per il progetto in esame, con una velocità di rango C pari a 110 km/h, il raggio minimo richiesto per i raccordi verticali, in base alle normative, è 4235 m. Si procede alla definizione delle curve. Si riporta a titolo d'esempio in Fig. 17, un particolare del raccordo lato Roma.

Definito il profilo si procede alle verifiche da normativa.

Secondo il cap. II.3 del manuale di progettazione armamento le verifiche necessarie sono: -Raggio minimo.

Si è visto in precedenza da cosa derivi il calcolo del raggio minimo, si riporta quindi una sola tabella riassuntiva dei 4 raggi utilizzati per raccordare le due quote.

I raggi vanno considerati a partire dalla progressiva

Tabella 4 – Table 4

Manuale di progettazione armamento [5]
Permanent way design manual [5]

II.3.14 RAGGIO DELLE CURVE ALTIMETRICHE R^v

I valori minimi R^v_{min} ammessi per il raggio delle curve altimetriche sono riportati nella seguente tabella:

V _F ≤ 200 km/h			200 km/h < V _F ≤ 300 Km/h		
Valore raccomandato	Valore limite	Valore eccezionale	Valore raccomandato	Valore limite	Valore eccezionale
0,35 V ² _{max} [m]	0,25 V ² _{max} [m]	2000[m]	0,35 V ² _{max} [m]	0,175 V ² _{max} [m]	0,175 V ² _{max} [m]
⁽¹⁾ con una tolleranza + di 10 % sui raccordi convessi e di + 30 % su quelli concavi					

V _F ≤ 200 km/h			200 km/h < V _F ≤ 300 Km/h		
Recommended value	Limit value	Exceptional value	Recommended value	Limit value	Exceptional value
0,35 V ² _{max} [m]	0,25 V ² _{max} [m]	2000[m]	0,35 V ² _{max} [m]	0,175 V ² _{max} [m]	0,175 V ² _{max} [m]
⁽¹⁾ with a tolerance + of 10% on convex connections and of 30% on concave ones					

connection to check the radii of curvature, in compliance with the regulations. In particular, the R.F.I. permanent way design manual, chapter II.3.14 shows Tab. 4with the checks to be carried out to ensure that the radii and curves comply with the design requirements.

These steps guarantee an optimal technical solution for the lowering of the upper surface of the rail, while respecting the geometric and regulatory constraints necessary for the railway infrastructure.

To determine the maximum speed allowed on the Roma Casilina-Cassino line, it is useful to refer to the route book shown in Fig. 16, which provides specific details based on the type of the trains that travel along it. Given that this line is mixed traffic, with the presence of both passenger and freight trains, it will be advisable to consider the highest type, that is, the one intended for high-speed passenger trains or the highest-performing trains.

For the project in question, with a type C speed equal to 110 km/h, the minimum radius required for the vertical transitions, according to the regulations, is 4235 m.

The curves are defined.

An example of a detail of the Rome side transitions is shown in Fig. 17.

Once the profile has been defined, the regulatory checks are carried out.

According to chap. II.3 of the permanent way design manual, the necessary checks are:

- Minimum radius.

We saw above what the calculation of the minimum radius derives from, therefore a single summary table of the 4 radii used to connect the two dimensions is shown.

SCIENZA E TECNICA

Linea ROMA TERMINI - CASSINO (Diretta)
 tratta ROMA TERMINI - ROMA CASILINA linea "FORMIA" (Diramata)

Grado di frenatura	Velocità massima Km/h DIRETTA Bln. LEGALE/Sx			Grado di frenatura	Velocità massima Km/h DIRAMATA				Progressive chilometriche	LOCALITA' DI SERVIZIO	Velocità massima Km/h DIRAMATA Bln. DESTRA				Grado di frenatura	Velocità massima Km/h DIRETTA Bln. ILLEGALE/Dx			Grado di frenatura
	A	B	C		A	B	C	P			A	B	C	P		A	B	C	
III	120	125	125	III	105	110	125	150	0,00	ROMA TERMINI	105	110	125	150	III	120	125	125	III
	140	150	150						4,25	ROMA CASILINA						140	150	150	
	100	105	110						9,98	Capannelle						100	105	110	
la ₃	125	135	145						13,00	Ciippo									la ₃
									13,92	CIAMPINO									
									15,00	Ciippo						125	135	145	
									20,57	Tor Vergata									
									25,71	Colle Mattia									
									28,26	Colonna									

Figura 16 - Velocità di linea sulla tratta Roma Casilina-Ciampino [6].
 Figure 16 - Line speed on the Rome Casilina-Ciampino section [6].

più bassa a quella più alta, seguendo quindi il percorso di un treno dispari che si muove da Roma Casilina verso Ciampino.

The radii must be considered starting from the lowest to the highest point, thus following the path of a down train that travels from Rome Casilina towards Ciampino.

Nella Tab. 5 si riportano le verifiche ottenute.

Tabella 5 – Table 5

- Pendenze.

Verifiche sul raggio minimo
 Minimum radius checks

Secondo il cap. II.3.11 le pendenze massime ammesse sono quelle della Tab. 6.

Raggio minimo – Minimum radius			
Pk	R _{min}	R	Verifica Verification
6+812 a 6+873	4235 m	5000 m	ok
6+873 a 6+928	4235 m	4373 m	ok
7+101 a 7+182	4235 m	6500 m	ok
7+182 a 7+236	4235 m	4374 m	ok

Anche qui va considerato l'itinerario da Roma Casilina a Ciampino, con i valori delle pendenze ricavati dal programma. Come fatto in precedenza si riporta la Tab. 7 con le verifiche.

- Lunghezza delle curve

Come recita il cap.II.3.12, "Le curve poste tra due livellette consecutive, quando possibile, devono avere uno

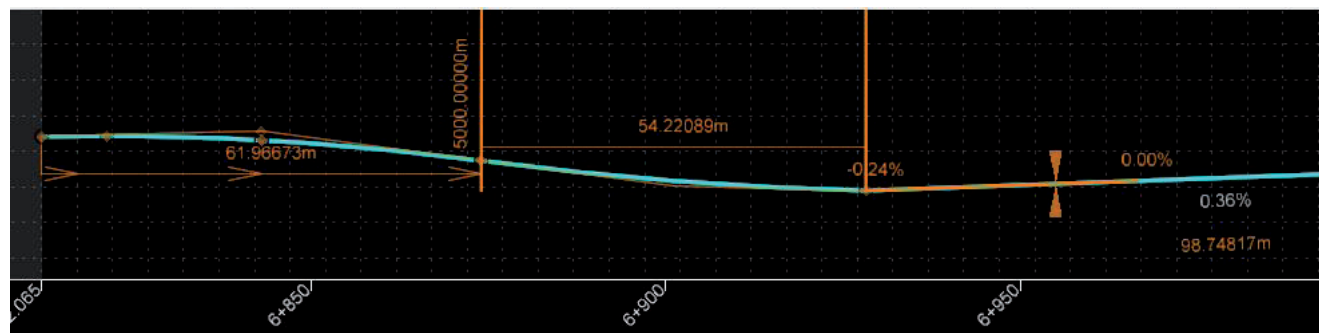


Figura 17 - Raccordo verticale dal Km 6+812 al Km 6+928.
 Figure 17 - Vertical transition from Km 6.812 to Km 6.928.

sviluppo non inferiore a 20 m, quando la differenza tra le pendenze è maggiore di:

2 mm/m (2‰) per velocità fino a 200 km/h

1 mm/m (1‰) per le velocità oltre 200 km/h.”

La Tab. 8 riporta le verifiche in esame.

Sono tutte rispettate, si può procedere alla fase successiva.

5.1.4. Modellazione della sede ferroviaria e delle opere civili

La modellazione descritta nel seguito riguarda l'utilizzo completo della tecnologia BIM. A tale riguardo, è necessario definire tutte le parti che compongono l'oggetto dello studio.

In primo luogo, si crea un nuovo file, nel quale si importano i file relativi al terreno e al profilo. Successivamente, si procede con la modellazione della sede ferroviaria, selezionando il profilo e utilizzando dalla libreria del programma un modello di sede ferroviaria conforme agli standard normativi italiani e corrispondente alle caratteristiche della linea in esame, ossia un doppio binario. Una volta individuato il template appropriato, lo si applica al profilo selezionato.

Conclusa la modellazione del binario, si passa alla modellazione delle due opere civili interessate: la galleria e il cavalcavia. Quest'ultimo è stato modellato utilizzando uno scatolare, adeguando le dimensioni alla geometria dell'opera esistente. Definito il template, lo si inserisce nel programma specificando le progressive chilometriche di inizio e fine, cioè dal Km 6+950 al Km 6+966.

Per quanto riguarda la galleria, è stato necessario un

Tabella 6 - Table 6
Pendenza livellette p_{max}^v - Cap. II.3.11 del manuale di progettazione d'armamento [5]
 p_{max}^v level grade stake - Ch. II. 3.11 of the permanent way design manual [5]

	Valore limite	Valore eccezionale
Traffico viaggiatori	35 ‰ ^{(a)(b)}	In occasione di ristrutturazione, potranno essere autorizzati valori meno restrittivi
Traffico misto	12 ‰ ^(a)	Potranno essere autorizzati valori meno restrittivi
^(a) Per linee che presentano curve planimetriche con raggio inferiore a 1.000 m nella definizione del valore della livelletta dovrà essere tenuto in conto anche l'incremento della pendenza dovuto alla resistenza addizionale in curva.		
^(a) Sempre che siano rispettate le seguenti condizioni: la media mobile della pendenza del profilo su 10 km deve essere inferiore o pari al 25 ‰; la lunghezza massima di pendenza continua di 35 ‰ non deve superare 6 km		
	Limit values	Exceptional values
Passenger traffic	35‰ ^{(a)(b)}	In the event of renovation less restrictive values can be authorised
Mixed traffic	12‰ ^(a)	Less restrictive values can be authorised
^(a) For lines with planimetric curves with a radius of less than 1000m, the increase in the slope resulting from additional resistance in the curve must be taken into account when defining the value of the level.		
^(a) As long as the following conditions are observed: the mobile average of the slope of the profile along 10 km must always be less than or equal to 25‰: the maximum continuous slope length of 35‰ must not exceed 6 km.		

Tab. 5 shows the verifications obtained.

- Slopes.

According to ch. II.3.11 the maximum slopes allowed are those in Tab. 6.

Here too, the route from Rome Casilina to Ciampino must be considered, with the slope values obtained from the software.

As previously done, Tab. 7 shows the verifications.

- Length of the curves

As stated in chap. II.3.12, "The curves placed between two consecutive grade stakes, when possible, must have a development of not less than 20 m, when the difference between the slopes is greater than:

2 mm/m (2‰) for speeds up to 200 km/h

1 mm/m (1‰) for speeds exceeding 200 km/h."

Tab. 8 shows the verifications in question.

They are all compliant, we can proceed to the next stage.

5.1.4. Modelling of the track bed and civil works

The modelling described below concerns the full use of BIM technology. In this regard, all the parts that make up the object of the study must be defined.

Tabella 7 - Table 7
Verifiche pendenze
Slope verifications

Pendenze - Slope			
Pk	I	I _{max}	Verifica Verification
6+812 a 6+873	12	12	ok
6+873 a 6+928	2,3	12	ok
6+298 a 7+101	3,6	12	ok
7+101 a 7+182	12	12	ok
7+182 a 7+236	2,6	12	ok

Tabella 8 – Table 8

Verifiche lunghezza delle curve
Curve length verifications

L curve		
L	L _{min}	Verifica Verification
61,96 m	20 m	ok
54,22 m	20 m	ok
81,03 m	20 m	ok
53,06 m	20 m	ok

dimensionamento geometrico manuale. Riprendendo i dati dell'esistente dalle tavole fornite da R.F.I., è stato disegnato un nuovo template, comprendente un arco poggiato su due sostegni in muratura. L'intervento proposto prevede inoltre la realizzazione di un arco rovescio e cordoli di collegamento per i micropali, che sono stati anch'essi modellati nel programma. Questa modellazione è stata applicata al tratto tra il Km 7+050 e il Km 7+076.

Di seguito, in Fig. 18, viene riportata una visione tridimensionale della progettazione completata:

Si è deciso di rappresentare tutta la parte di linea interessata dall'abbassamento ferroviario. In Fig. 19 si riporta un particolare sulla visualizzazione 3D della galleria.

5.1.5. Realizzazione delle sezioni trasversali

Terminata la fase di modellazione, è possibile estrapolare le tavole necessarie per la presentazione del progetto. Si procede ora alla definizione del passo delle sezioni trasversali da realizzare. Utilizzando il comando "contorni", si può determinare l'intervallo delle sezioni trasversali che il programma genererà. Il tempo di elaborazione varia in base al numero di sezioni da produrre; pertanto, è consigliabile scegliere un intervallo adeguato in funzione del lavoro da svolgere.

Si riportano, a titolo esemplificativo, tre tipologie di sezioni trasversali:

- Linea ferroviaria.
- Galleria.
- Cavalcaferrovia.

Per quanto riguarda la linea ferroviaria, il livello di dettaglio è fedele alla realtà, mentre per la galleria e il cavalcaferrovia mancano alcuni particolari. Questo deficit è dovuto alla necessità di un approfondimento maggiore nella modellazione di entrambe le opere e ad

First of all, a new file is created, in which the files relating to the terrain and the profile are imported. Subsequently, we proceed with the modelling of the track bed, selecting the profile and using a track bed model from the software library that complies with Italian regulatory standards and corresponds to the characteristics of the line in question, i.e. a double track. Once the appropriate template has been identified, it is applied to the selected profile.

After the modelling of the track, we proceed to the modelling of the two civil works involved: the gallery and the overpass. The latter was modelled using a box, adapting the dimensions to the geometry of the existing work. Once the template has been defined, it is introduced in the software specifying the start and end kilometric points, that is, from Km 6.950 to Km 6.966.

As for the tunnel, manual geometric sizing was necessary. A new template was designed taking the existing data from the tables provided by R.F.I., including an arch resting on two masonry supports. The proposed task also provides for the creation of an inverted arch and connecting curbs for the micro piles, which have also been modelled in the software. This modelling was applied to the section between Km 7.050 and Km 7.076.

A three-dimensional view of the completed design is shown in Fig. 18 below:

It was decided to represent the entire part of the line affected by the railway lowering.

Fig. 19 shows a detail on the 3D visualisation of the tunnel.

5.1.5. Construction of cross sections

Once the modelling phase is finished, the tables necessary

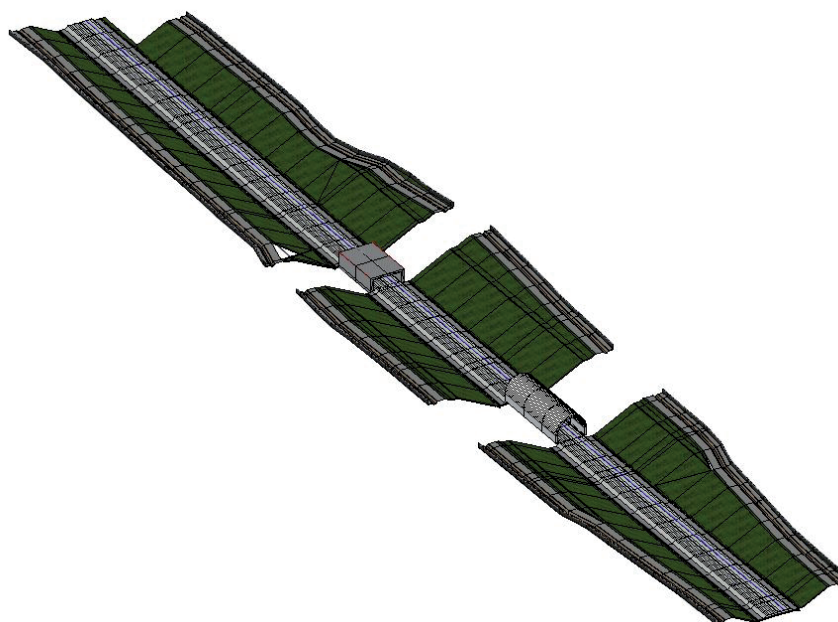


Figura 18 - Ricostruzione 3D del modello.
Figure 18 - 3D reconstruction of the model.

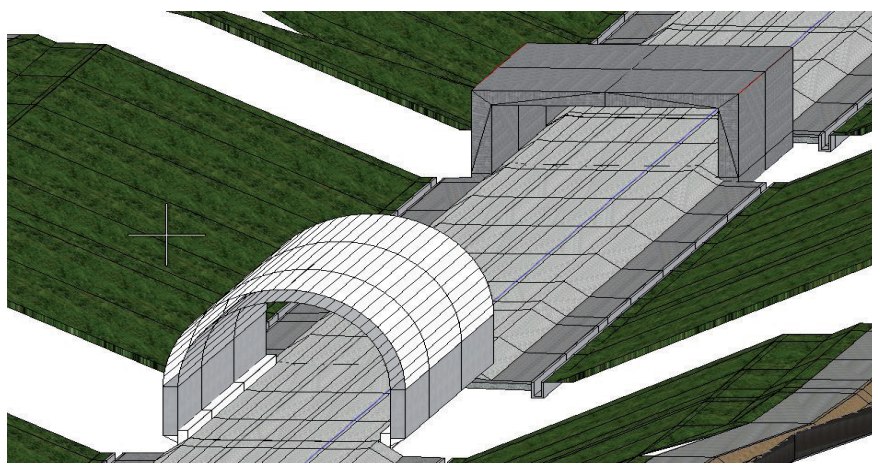


Figura 19 - Particolare della modellazione della galleria.
 Figure 19 - Detail of the modelling of the tunnel.

una cura che non è stato possibile garantire con il tempo disponibile. Le sezioni ricavate vengono comunque utilizzate per il confronto con quelle disegnate in DWG.

5.2. Analisi dei costi

Una volta terminata la fase di modellazione e stesura delle tavole, è possibile procedere ad un'analisi dei costi basandosi su quello che è il prezzario corrente.

Per il livello di dettaglio richiesto si andranno ad analizzare le quantità richieste di ogni materiale, le eventuali maggiorazioni per lavorazioni in IPO notturne, andando quindi a redigere un computo metrico che non riporteremo. Conformemente ad altri interventi simili svolti da R.F.I. si può stimare il costo complessivo delle opere civili, che include una maggiorazione del 20% per gli interventi preliminari ed un 5% per la progettazione esecutiva. Gli interventi risolutivi sono la parte più consistente e verranno elencati più avanti. Per gli oneri relativi alla sicurezza una stima su base analitica, dei costi delle misure preventive e protettive finalizzate alla sicurezza e salute

Tabella 9 – Table 9

Quadro economico generale
 General economic framework

QUADRO ECONOMICO GENERALE GENERAL ECONOMIC FRAMEWORK	
Interventi preliminari <i>Preliminary tasks</i>	€ 89.037,17
Interventi risolutivi <i>Decisive tasks</i>	€ 445.185,84
Progettazione esecutiva <i>Executive design</i>	€ 22.259,29
Oneri per la sicurezza <i>Safety charges</i>	€ 17.807,43
Totale <i>Total</i>	€ 574.289,73

for the presentation of the project can be extracted. We now proceed to define the pitch of the cross sections to be executed. Using the “contours” command, the range of cross sections that the programme will generate can be determined. The processing time varies according to the number of sections to be produced; therefore, it is advisable to choose an appropriate interval depending on the work to be carried out.

By way of example, three types of cross sections are shown:

- Railway Line.
- Gallery.
- Railway overpass.

As for the railway line, the level of detail is true to reality, while some details are missing for the tunnel and the overpass. This deficit is due to the need for greater depth in the modelling of both works and to the care that could not be guaranteed with the time available. The sections obtained are however used for comparison with those drawn in DWG.

5.2. Cost Analysis

Once the modelling and drafting phase of the tables is finished, an analysis of the costs can be carried out based on what the current price list is.

For the level of detail required, the quantities needed of each material will be analysed, any surcharges for work in night IPOs, thus drawing up a metric calculation that we will not report. In accordance with other similar task carried out by R.F.I., the total cost of civil works can be estimated, which includes an increase of 20% for preliminary tasks and 5% for the executive design. The resolution works are the most substantial part and will be listed below. For safety-related costs, an estimate on an analytical basis of the costs of preventive and protective measures aimed at the safety and health of workers can be drawn up in the Safety and Coordination Plan; at present, taking into account the level of progress and in-depth design achieved, an impact of 4% on the total amount of work is estimated. The result can be seen in Tab. 9.

Finally, the various work organisation hypotheses will be analysed, with particular attention to the impact on rail traffic and construction costs. For the purposes of this study, the same costs as civil works are applied, while being aware of the surcharges due to work at night interruption – these surcharges were considered when calculating the metric calculation – and the presence of circulation (estimated only indicatively).

6. Impact on railway operation

All the work described so far will have a significant impact on traffic, as it must be carried out in the absence of

dei lavoratori potrà essere redatta nel PSC; allo stato attuale, tenuto presente il livello di avanzamento e approfondimento progettuale raggiunto, si stima una incidenza del 4% sull'importo totale dei lavori. Il quadro finale che emerge è quello riportato in Tab. 9.

Infine, verranno analizzate le diverse ipotesi di organizzazione delle lavorazioni, con particolare attenzione all'impatto sulla circolazione ferroviaria e ai costi di realizzazione. Ai fini di questo studio, si applicano gli stessi costi delle opere civili, pur essendo consapevoli delle maggiorazioni dovute alle lavorazioni in interruzione notturna – tali maggiorazioni sono state considerate in fase di calcolo del computo metrico – e della presenza di circolazione (stimate solo indicativamente).

6. Impatto sull'esercizio ferroviario

Tutte le lavorazioni descritte finora avranno un impatto significativo sulla circolazione, poiché dovranno essere eseguite in assenza di traffico ferroviario. Una parte delle operazioni relative alla galleria potrà essere svolta durante interruzioni programmate d'orario (IPO), generalmente eseguite di notte. Come stabilito dall'RCT, all'articolo 18, commi 1-2: "Le interruzioni [...] sono delimitate da ore, indicate rispettivamente nell'Orario di servizio o nel programma. [...] Nessun treno o manovra può essere inoltrato su un tratto di binario interrotto" [7]. Le restanti lavorazioni, a causa della loro complessità, richiedono un'interruzione continua del binario o della tratta. Per valutare adeguatamente l'impatto sulla circolazione, è fondamentale considerare il numero medio di viaggiatori sul tratto in esame. Si stima che, nei mesi da settembre a luglio, il traffico medio sia di circa 30.000 viaggiatori, mentre nel mese di agosto sia di 10.000 viaggiatori.

La linea oggetto dell'intervento è una linea ad alto traffico, che serve i collegamenti tra Roma e località come Cassino, Napoli, Benevento, Caserta, Frosinone, Colleferro, Albano, Velletri, Frascati e Ciampino. Di conseguenza, l'interruzione della circolazione richiederà una riprogrammazione completa del servizio, con l'attestazione dei treni a Ciampino e l'organizzazione di bus sostitutivi. Quest'ultima opzione rappresenta la principale voce di spesa e comporta un prolungamento dei tempi di percorrenza per i viaggiatori diretti a Roma Termini. Sono state proposte tre ipotesi per l'organizzazione delle lavorazioni, con tempi stimati sulla base di interventi analoghi eseguiti da R.F.I.:

- 41 giorni di interruzione totale;
- 30 giorni di IPO e 30 giorni di interruzione totale;
- 30 giorni di IPO e 60 giorni di interruzione parziale.

Per minimizzare i costi e ridurre l'impatto sul traffico viaggiatori, si cercherà di concentrare le interruzioni totali nel mese di agosto, in cui il numero di viaggiatori è inferiore. Di seguito, si analizzeranno in dettaglio le tre ipotesi per confrontare i costi e i tempi di realizzazione, al fine di individuare la soluzione più adeguata.

rail traffic. Part of the operations related to the tunnel can be carried out during scheduled service break (IPO), generally carried out at night. As established by the Train Running Regulation, in article 18, paragraphs 1-2: "Interruptions [...] are circumscribed by hours, indicated respectively in the Hours of Service or in the programme. [...] No train or manoeuvre may be relayed on an interrupted track section" [7].

Due to their complexity, the remaining works require a continuous interruption of the track or section. To properly assess the impact on traffic, it is essential to consider the average number of travellers on the section in question. It is estimated that, in the months from September to July, the average traffic is about 30,000 travellers, while in August it is 10,000 travellers.

The line object of the work is a high traffic line, which serves the connections between Rome and places such as Cassino, Naples, Benevento, Caserta, Frosinone, Colleferro, Albano, Velletri, Frascati and Ciampino. As a result, the interruption of circulation will require complete rescheduling of the service, with the final destination of trains in Ciampino and the organisation of replacement buses. The latter option represents the main item of expenditure and involves an extension of travel times for travellers to Rome Termini. Three hypotheses have been proposed for the organisation of work, with times estimated on the basis of similar tasks carried out by R.F.I.:

- 41 days of total disruption;
- 30 days of IPO and 30 days of total disruption;
- 30 days of IPO and 60 days of partial disruption.

To minimise costs and reduce the impact on traveller traffic, we will try to concentrate total disruptions in August, where the number of travellers is lower. Below, the three hypotheses will be analysed in detail to compare costs and implementation times, in order to identify the most appropriate solution.

6.1. Total service break for 41 days

The first hypothesis envisages a complete service break of the section (Fig. 22) for 41 days, allowing the works to be completed in the shortest possible time. The work phases would be organised as follows: - Railway site set-up;

- mortar injections behind the tunnel lining;
- epoxy resin injections for the consolidation of the tunnel lining;
- polyurethane resin injections for waterproofing behind the tunnel lining;
- drainage realisation;

Given the delicacy of these operations, the arrangement of the various injections is shown by way of example in Fig. 20, as per previous projects presented by R.F.I.

- execution of the micro piles at the base of the piers and construction of the connecting curb;

6.1. Interruzione totale per 41 giorni

La prima ipotesi prevede un'interruzione completa della tratta (Fig. 22) per 41 giorni, permettendo di completare i lavori nel tempo più breve possibile. Le fasi lavorative sarebbero organizzate come segue:

- allestimento cantiere ferroviario;
- iniezioni di malta a tergo del rivestimento della galleria;
- iniezioni di resine epossidiche per il consolidamento del rivestimento della galleria;
- iniezioni di resina poliuretanic per l'impermeabilizzazione a tergo del rivestimento della galleria;
- realizzazione drenaggio.

Vista la delicatezza di queste operazioni, si riporta a titolo semplificato, in Fig. 20, la disposizione delle varie iniezioni come da progetti precedenti presentati da R.F.I.

- esecuzione dei micropali alla base dei piedritti e realizzazione cordolo di collegamento;
- rimozione del binario, scavo e abbassamento della quota delle parti non interessate dalle due opere civili;
- realizzazione muri di sostegno per altezze di scavo maggiori di 50cm;
- rimozione della sovrastruttura ferroviaria, scavo a sezione obbligata fino al piano di imposta dell'arco rovescio della galleria Km 7+050 e della pavimentazione del cavalerferrovia Km 6+950;

- removal of the track, excavation and lowering of the portion of the parts not affected by the two civil works;

- construction of support walls for excavation heights greater than 50 cm;

- removal of the railway superstructure, forced section excavation up to the level of the inverted arch of the 7.050 Km tunnel and the pavement of the overpass Km 6.950;

- restoration of the ballast and of the track to the areas outside the civil works;

- execution of the inverted arch of the 7.050 km tunnel;

- restoration of the ballast and the track at Km 7.050 and 6.950;

- dismantlement of the construction site.

A Gantt diagram will be presented below in Fig. 21 with information on the time required for each work phase.

A significant impact on rail traffic and travellers is expected given the estimated duration of the work, also concentrating operations in the second half of July and in August. Using the Network Statement (PIR) tables [8], the lost revenue for R.F.I. can be estimated due to the cut off of the train paths in the section affected by the service break.

The cost of each train paths is the sum of two components: A and B.

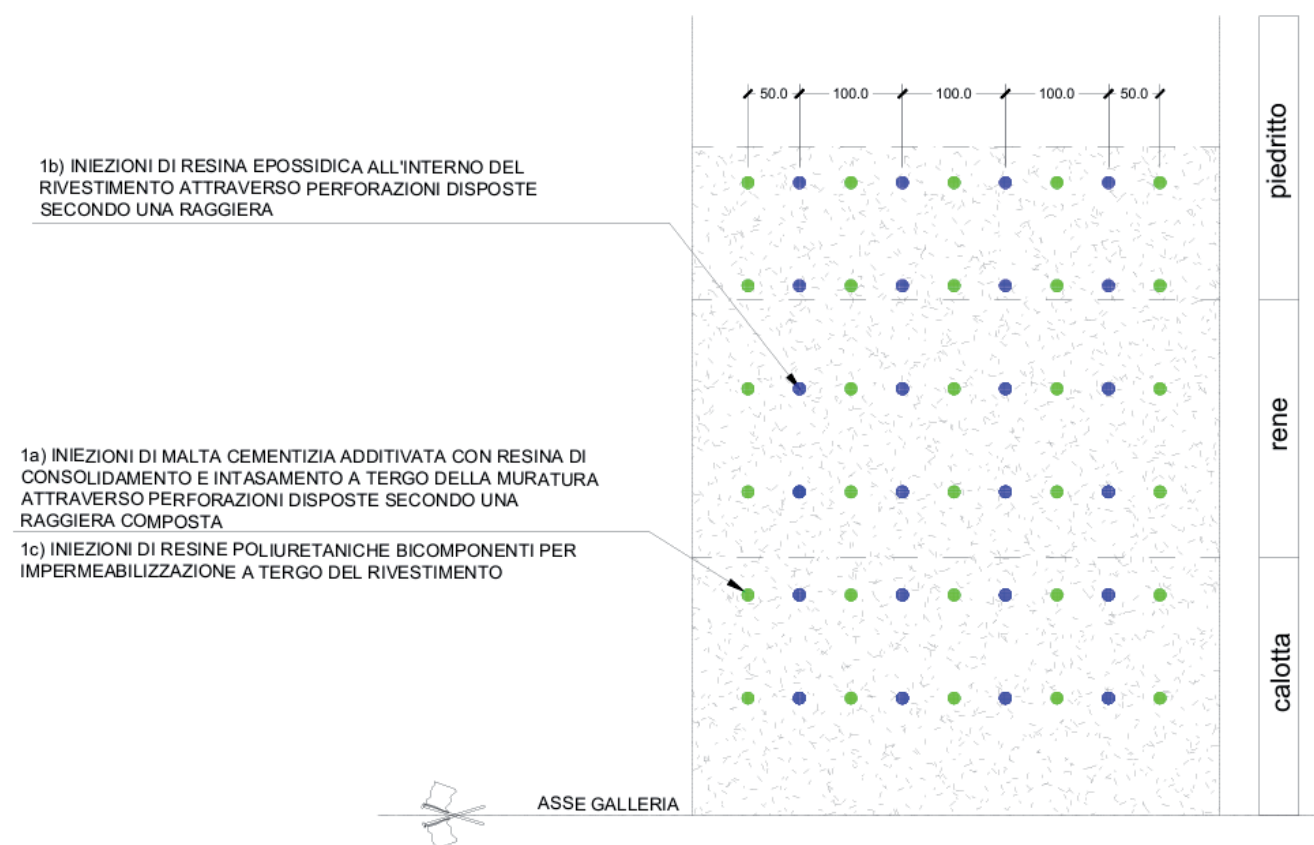


Figura 20 - Disposizione planimetrica delle perforazioni.
Figure 20 - Planimetric arrangement of perforations.

SCIENZA E TECNICA

- ripristino della massicciata e del binario alle zone esterne alle opere civili;
- esecuzione arco rovescio galleria Km 7+050;
- ripristino della massicciata e del binario al Km 7+050 e 6+950;
- smobilitazione del cantiere.

Di seguito, nella Fig. 21 verrà presentato un diagramma di Gantt con le informazioni sui tempi necessari per ciascuna fase lavorativa.

Vista la durata stimata dei lavori, anche concentrando le operazioni nella seconda metà di luglio e nel mese di agosto, si prevede un impatto significativo sulla circolazione ferroviaria e sui viaggiatori. Utilizzando le tabelle del PIR [8], è

6.1.1. Component A

The component A of the toll is divided into three additional sub-components A1, A2, A3:

$$A = A1_{weight} + A2_{speed} + A3_{contact\ line}$$

The value of component A is given by the following formula:

$$A = (T_{A1} + T_{A2} + T_{A3}) \times Km$$

The Rome Termini Ciampino section is 14 Km long, the weight class of the circulating rolling stock is 1, therefore T_{A1} is equal to €0.377/km, the speed class has already been addressed in the previous chapters and is 2, therefore T_{A2} is

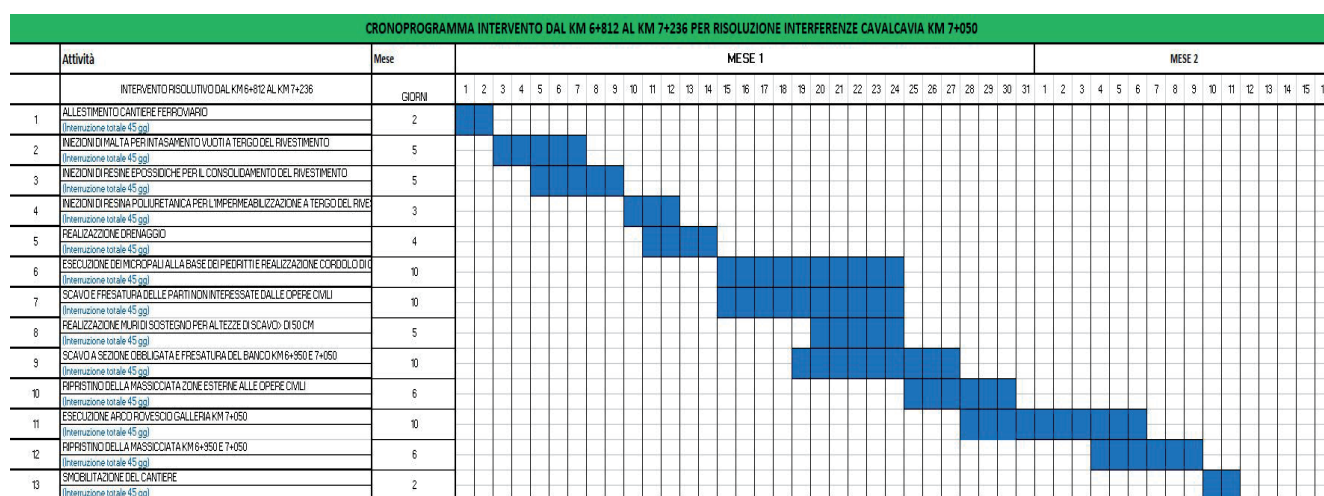


Figura 21 - Gantt intervento 1.
Figure 21 - Gantt task 1.

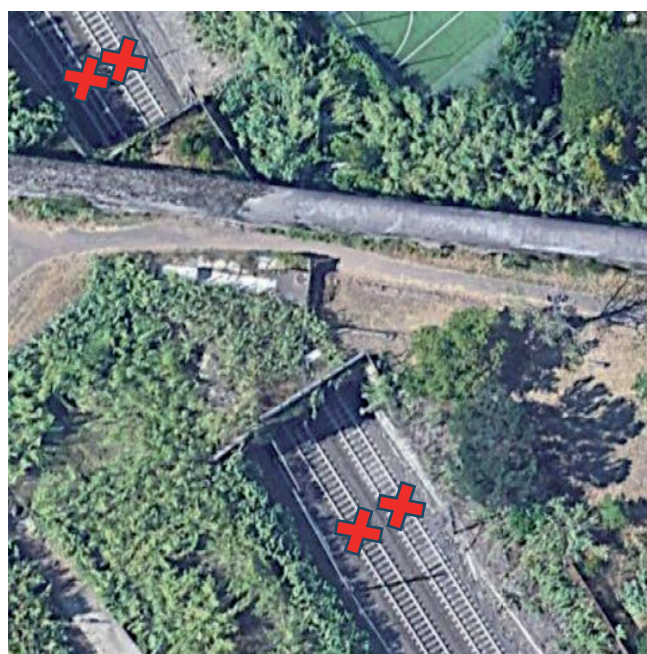


Figura 22 - Interruzione totale.
Figure 22 - Total service break.

equal to €0.195/km, the type of traction is electric T_{A3} it is equal to €0.023/km.

Component A is equal to €8.33.

6.1.2. Component B

The value of component B can be calculated from the result of a unit rate, divided by market segments, for the kilometres travelled, according to the following formula: $B = T_B \times Km$.

The value of T_B is shown in Tab. 10 below.

All circulating trains that enter the Rome node are regional and with a speed greater than 75Km/h, so, as shown in Tab. 10, they are Hub Sprints; therefore, the value of T_B is €2.974/km. $B = 2.974 \times 14 = €41.636$.

6.1.3. Total cost per track

The cost of each track, sum of components A and B, is therefore:

$$A + B = 8.33 + 41.636 = €49.97$$

Multiplying by the total number of trains running daily on the line (167 trains between FL6 Rome-Cassino and FL4

possibile stimare i mancati introiti per R.F.I. dovuti al taglio delle tracce nella tratta interessata dall'interruzione. Il costo di ciascuna traccia è la somma di due componenti: A e B.

6.1.1. Componente A

La componente A del pedaggio è articolata in tre sub-componenti additive A1, A2, A3:

$$A = A1_{\text{peso}} + A2_{\text{velocità}} + A3_{\text{linea di contatto}}$$

Il valore della componente A è dato dalla seguente formula:

$A = (T_{A1} + T_{A2} + T_{A3}) \times \text{Km}$ La tratta Roma Termini Ciampino è lunga 14Km, la classe di peso dei materiali circolanti è la 1, quindi T_{A1} è pari a 0,377 €/km, la classe di velocità è stata già affrontata nei capitoli precedenti ed è la 2, quindi T_{A2} è pari a 0,195 €/km, il tipo di trazione è elettrica T_{A3} è pari a 0,023 €/km. La componente A risulta essere pari a 8,33€.

6.1.2. Componente B

Il valore della componente B è calcolabile dal prodotto di una tariffa unitaria, articolata per segmenti di mercato, per i km percorsi, secondo la seguente formula: $B = T_B \times \text{Km}$. Il valore di T_B è riportato nella Tab. 10.

Tutti i treni circolanti sono regionali che entrano nel nodo di Roma e hanno una velocità maggiore di 75Km/h, quindi, come riportato in Tab. 10, sono Hub Sprint; pertanto, il valore di T_B è 2,974 €/km. $B=2,974 \times 14=41,636€$.

6.1.3. Costo totale per traccia

Il costo di ciascuna traccia, somma delle componenti A e B, è quindi:

$$A+B=8,33+41,636=49,97€$$

Moltiplicando per il numero totale di treni che circolano quotidianamente sulla linea (167 treni tra FL6 Roma-Cassino e FL4 Roma-Castelli), e per il numero di giorni di interruzione (41 giorni), il mancato introito complessivo per R.F.I. è:

$$49,97 \times 167 \times 41 = 366.700,47€$$

6.1.4. Costo bus sostitutivi

Il costo di un singolo bus sostitutivo è stimato pari a 500 € al giorno.

- Nel mese di luglio, con un traffico di 30.000 viaggiatori,

Rome-Castelli), and by the number of days of interruption (41 days), the total lost revenue for R.F.I. is:

$$49,97 \times 167 \times 41 = € 366.700,47$$

6.1.4. Replacement bus cost

The cost of a single replacement bus is estimated at €500 per day.

- In July, with a traffic of 30,000 passengers, 600 buses per day would be needed to cover the entire day of service break, for 11 days of total disruption, generating a total cost of:

$$600 \times 500 \times 11 = €3,300,000$$

In August, with a reduction in traffic to 10,000 travellers, 200 buses would be needed per day, for 30 days, with a total cost of:

$$200 \times 500 \times 30 = €3,000,000$$

In addition to the economic costs, the impact on travel times of travellers must be considered. The travel time, which normally stands at 10-15 minutes by train, would be extended to 45-60 minutes with the replacement buses, which would have to deal with traffic in and out of Rome. According to the Rome Mobility report, "a city with a road network of 8,000 km, of which 1,300 km of main network, with 370,000 private vehicles per day during peak hours, records an average speed of 18 km/h, while TPL cars stand at 14 km/h" [9]. In peak hours, travel times could exceed 60 minutes, creating considerable inconvenience for travellers. Summing all the expenditure items the first work has a total cost shown in Tab. 11.

6.2. 30 days of IPO and 30 days of total service break

In this second scenario, the processes are divided into two phases: 30 days of scheduled night-time service break (IPO) and 30 days of total service break, with the aim of reducing the impact on rail traffic and passengers. Compared to the first hypothesis, this approach allows the total service break part to be concentrated during the month of August, with a lower number of travellers involved and a reduced overall cost.

Costs

- Replacement buses: The estimated cost for replacement buses, reducing passenger traffic in August, is €3,000,000.
- Revenue shortfalls for train paths: Revenue shortfalls resulting from the sale of railway train paths amount to €250,329.6.

Summing all the expenditure items the second tasks has a total cost shown in Tab. 12.

Fig. 23 shows the Gantt of the work.:

6.3. 30 days of IPO (Scheduled interruption) and 60 days of partial service break

The third hypothesis involves the division of the work

Tabella 10 – Table 10

“Estratto Tabelle PIR 5.4 [8]”
“Section of 5.4 PIR Tables [8]”

OSP - Lunga Percorrenza	OSP - LP - Notte	1,187
	Nodo Hub-SPRINT	2,974
OSP - Regionali	Nodo Hub	2,903
	Nodo Hub-HOLY	2,582
	Nodo Ring	2,817
	Nodo Ring - HOLY	2,513
	No Nodo	1,670
	No Nodo - HOLY	1,403

sarebbero necessari 600 bus al giorno per coprire l'intera giornata di interruzione, per 11 giorni di interruzione totale, generando un costo complessivo di:

$$600 \times 500 \times 11 = 3.300.000\text{€}$$

Nel mese di agosto, con una riduzione del traffico a 10.000 viaggiatori, sarebbero necessari 200 bus al giorno, per 30 giorni, con un costo complessivo di:

$$200 \times 500 \times 30 = 3.000.000\text{€}$$

Oltre ai costi economici, va considerato l'impatto sui tempi di percorrenza dei viaggiatori. Il tempo di viaggio, che normalmente si attesta sui 10-15 minuti in treno, si estenderebbe a 45-60 minuti con i bus sostitutivi, che dovrebbero affrontare il traffico in entrata e in uscita da Roma. Secondo il rapporto di Roma Mobilità, "una città con una rete stradale di 8.000 km, di cui 1.300 km di rete principale, con 370.000 veicoli privati al giorno nelle ore di punta, registra una velocità media di 18 km/h, mentre le vetture del TPL si attestano a 14 km/h" [9]. Nelle ore di punta, i tempi di percorrenza potrebbero superare i 60 minuti, creando notevoli disagi per i viaggiatori.

Sommando tutte le voci di spesa per il primo intervento abbiamo un costo totale pari a quello in Tab. 11.

6.2. 30 giorni di IPO e 30 giorni di interruzione totale

In questa seconda ipotesi, le lavorazioni vengono suddivise in due fasi: 30 giorni di interruzioni programmate d'orario notturne (IPO) e 30 giorni di interruzione totale, con l'obiettivo di ridurre l'impatto sulla circolazione ferroviaria e sui viaggiatori. Rispetto alla prima ipotesi, questo approccio consente di concentrare la parte di interruzione totale durante il mese di agosto, con un numero inferiore di viaggiatori coinvolti e un costo complessivo ridotto.

Costi

- Bus sostitutivi: Il costo stimato per i bus sostitutivi, riducendo il traffico passeggeri nel mese di agosto, è pari a 3.000.000 €.
- Mancati introiti per tracce: I mancati introiti derivanti dalla vendita delle tracce ferroviarie ammontano a 250.329,6 €.

Sommando tutte le voci di spesa per il secondo intervento abbiamo un costo totale pari a quello in Tab. 12.

Si riporta, nella Fig. 23, il Gantt dell'intervento.

6.3. 30 giorni di IPO e 60 giorni di interruzione parziale

La terza ipotesi prevede la suddivisione delle lavorazioni in tre fasi, con un approccio misto che mira a mantenere una parte della circolazione ferroviaria attiva:

- Prima fase: 30 giorni di IPO notturne, per lavorazioni che non richiedono un'interruzione totale della linea.
- Seconda fase: 30 giorni di interruzione del binario dispari.
- Terza fase: 30 giorni di interruzione del binario pari (Fig. 24).

into three phases, with a mixed approach that aims to keep part of the rail traffic in operation:

- First phase: 30 days of night IPO (scheduled service break), for operations that do not require total service break of the line.
- Second phase: 30 days of down track service break.
- Third phase: 30 days of up track service break (Fig. 24).

This solution takes advantage of the two-way double track, which allows reversing the direction of block and using a single track to circulate the trains in both directions.

6.3.1. Benefits and challenges

- Maintenance of circulation: A significant advantage of this solution is that it will not be necessary to organise replacement buses, at least in the first analysis, drastically reducing costs.
- Circulation remodulation: The circulation of trains will have to be reorganised to manage the passing at Rome Casilina and Ciampino stations, limiting the trains of the FL4 Rome-Castelli line to Ciampino to create corridors dedicated to the trains of the FL6 Rome-Cassino.
- Extraordinary stops: Extraordinary stops could be introduced in Ciampino for incoming trains from Frascati,

Tabella 11 – Table 11

Costo intervento 1
Cost of task 1

QUADRO ECONOMICO GENERALE GENERAL ECONOMIC FRAMEWORK	
Costo opere civili Cost of civil works	€ 574,289.73
Costo bus sostitutivi Cost of replacement buses	€ 6,300,000.00
Mancati introiti Revenue loss	€ 366,700.47
Totale Total	€ 7,240,990.21

Tabella 12 – Table 12

Costo intervento 2
Cost of task 2

QUADRO ECONOMICO GENERALE GENERAL ECONOMIC FRAMEWORK	
Costo opere civili Cost of civil works	€ 574,289.73
Costo bus sostitutivi Cost of replacement buses	€ 3,000,000.00
Mancati introiti Revenue loss	€ 250,329.66
Total Total	€ 3,824,619.39

lazione, specialmente in caso di guasti, con un aumento dei costi operativi sia in condizioni di esercizio regolare che in situazioni di degrado (soppressioni, limitazioni, impiego di bus sostitutivi).

6.4. Confronto tra le ipotesi

Nell’analisi finale, si confrontano le tre ipotesi, valutando l’impatto economico, i costi operativi, e il disagio per i viaggiatori. Si riportano grafici di confronto che evidenziano i vantaggi e gli svantaggi di ciascuna soluzione, al fine di identificare quella più adeguata.

Costi: Fig. 25 e Tab. 14.

Durata della sospensione della circolazione su uno o entrambi i binari: Fig. 26 e Tab. 15.

Treni limitati: Fig. 27 e Tab. 16.

7. Conclusioni

Alla luce di quanto analizzato, la seconda soluzione risulta la più percorribile. I costi sono nella media rispetto ad altri interventi simili eseguiti da R.F.I. e l’impatto sulla circolazione è moderato, grazie alla concentrazione dell’interruzione nel mese di agosto. Questo permette di minimizzare i disagi per i viaggiatori, che risultano ridotti a causa del minor numero di utenti nel periodo estivo. Inoltre, il carico di lavoro per i regolatori della circolazione rimane entro limiti accettabili, senza un incremento eccessivo.

L’intero progetto è stato sviluppato utilizzando strumenti con tecnologia BIM, dalla fase di rilevamento delle interferenze, fino all’elaborazione della soluzione proposta. Sebbene siano state utilizzate attrezzature non strettamente professionali, i vantaggi dimostrati in termini di

could increase the workload for traffic controllers and for command centres such as the Rome Casilina traffic controller and the Cassino ACCM section regulator. A failure in the system would result in the application of the rules provided for by the Instructions for Electric Block Systems Operation (IESBE) part III, with significant impacts on circulation and delays, resulting in additional costs for RFI and inconvenience for travellers.

Summing all the expenditure items the third task has a total cost shown in Tab. 13.

6.3.2. Limits

This hypothesis is particularly advantageous in August; however, in September, with the increase in the number of travellers, it may not guarantee an adequate service, making it necessary to adopt replacement buses to maintain an efficient service level, with consequent significant increase in costs, as in previous cases.

As already mentioned, the charges related to the safety of the work in the presence of railway operation would also entail additional costs, which are not considered here.

Finally, the prolonged management of the reversal of the block represents a risk factor for the fluidity of circulation, especially in the event of breakdowns, with an increase in operating costs both in conditions of regular operation and in situations of degradation (cancellations, limitations, use of replacement buses).

6.4. Comparison between the hypotheses

In the final analysis, the three hypotheses are compared, assessing the economic impact, operating costs, and dis-

Tabella 14 – Table 14

Costi Costs	
Costi	
1	€ 7,240,990.21
2	€ 3,824,619.39
3	€ 943,038.81

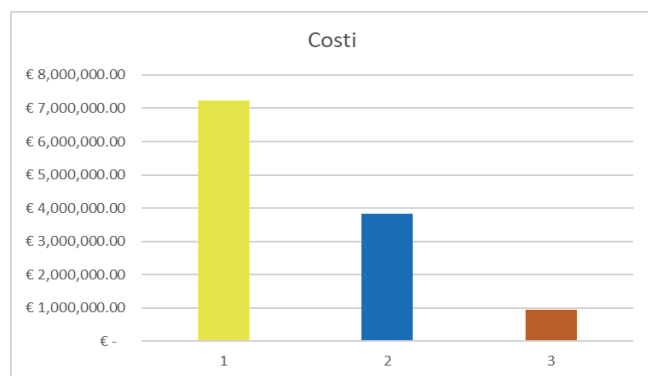


Figura 25 - Confronto costi.
Figure 25 – Cost comparison.

Tabella 15 – Table 15

Durata Duration	
Durata	
1	41
2	30
3	60

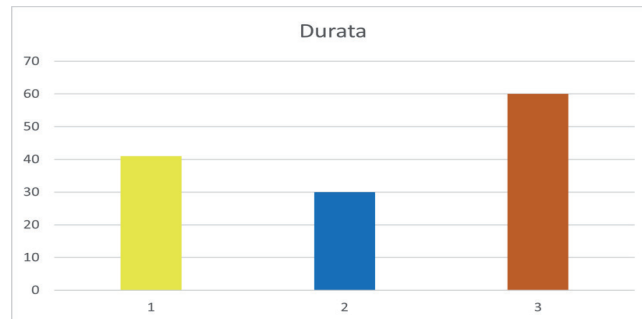


Figura 26 - Confronto durata della sospensione della circolazione.
Figure 26 – Comparison of duration of service break of circulation.

Tabella 16 – Table 16

Treni limitati
Limited trains

Treni limitati	
1	6847
2	5010
3	7380

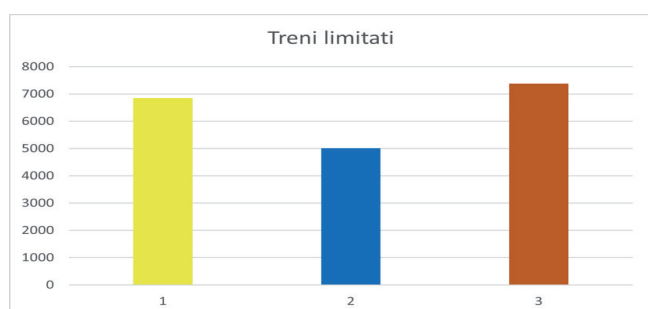


Figura 27 - Confronto numero di treni limitati.

Figure 27 - Comparison of the number of limited trains.

versatilità, integrazione, semplicità e completezza rendono questo approccio un'alternativa valida rispetto alle metodologie tradizionali usate per la progettazione di interventi sull'infrastruttura ferroviaria.

L'uso dei droni in fase di rilevamento ha garantito una maggiore velocità nelle prime analisi delle interferenze, evitando l'impiego di laser scanner o treni diagnostici. Questo ha permesso di costruire modelli che si integrano perfettamente con la progettazione BIM, tecnologia ormai diventata uno standard imprescindibile sia a livello nazionale che internazionale.

comfort for travellers. Comparison graphs are shown that highlight the advantages and disadvantages of each solution, in order to identify the most appropriate one.

Costs: Fig. 25 and Tab. 14.

Duration of service break of circulation on one or both tracks: Fig. 26 and Tab. 15.

Limited trains: Fig. 27 and Tab. 16.

7. Conclusions

In light of what has been analysed, the second solution is the most feasible. Costs are average compared to other similar works carried out by R.F.I. and the impact on circulation is moderate, thanks to the concentration of interruption in August. This minimises the inconvenience for travellers, which is reduced due to the lower number of users in the summer. In addition, the workload for traffic controllers remains within acceptable limits, without an excessive increase.

The entire project has been developed using BIM technology tools, from the interference detection phase, to the elaboration of the proposed solution. Although not strictly professional equipment was used, the advantages demonstrated in terms of versatility, integration, simplicity and completeness make this approach a valid alternative to the traditional methodologies used for the design of works on railway infrastructure. The use of drones during the survey phase guaranteed greater speed in the initial analysis of interference, avoiding the use of laser scanners or diagnostic trains. This has allowed building models that integrate perfectly with BIM design, a technology that has now become an essential standard both nationally and internationally.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] R.F.I.(2016), "Prefazione generale all'orario di servizio in uso sull'infrastruttura nazionale per i convogli di R.F.I.", edizione 2016..
- [2] ECR Italia (2014), "Trasporto ferroviario merci Documento tecnico", Giugno.
- [3] R.F.I. (2019), "Caratteristiche tecnico-funzionali dell'infrastruttura ferroviaria nazionale gestita da RFI", edizione 2019.
- [4] R.F.I. (1992), "La tecnica professionale", n.4 Aprile.
- [5] R.F.I. DTCSI M AR 01 001 1 A (2019), "Manuale di progettazione armamento", , edizione 2019.
- [6] R.F.I. (2013), "Fascicolo linea 116, Roma Termini-Cassino, Roma Ostiense-Roma Casilina(linea locale), Roma Smitamento-Roma Tiburtina(linea lenta e linea merci),Roma Tiburtina-Roma Casilina(linea locale e linea indipendente), Avezzano-Roccasecca, Ciampino-Albano/Frascati/Velletri", edizione Dicembre.
- [7] Rapporto Mobilità Roma (2019), Url:<https://romamobilita.it/it/media/pubblicazioni/rapporto-mobilita-2019>.
- [8] Prospetto informativo di rete, II edizione, dicembre 2021.