

UNIVERSITÀ DI PISA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE  
"Vie e Trasporti"

"STUDIO DI FATTIBILITÀ TECNICA E STIMA DEL COSTO DI UNA  
IPOTESI DI INTERRAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA  
NELL'ATTRAVERSAMENTO URBANO DI ALTOPASCIO E DI ALTRE  
SOLUZIONI ALTERNATIVE PER L'ELIMINAZIONE  
DEL PASSAGGIO A LIVELLO"

## RELAZIONE FINALE

Maggio 2005

IL RESPONSABILE SCIENTIFICO

*Prof. Ing. Antonio Pratelli*

IL DIRETTORE DEL DIPARTIMENTO

*Prof. Ing. Massimo Dringoli*

GRUPPO DI LAVORO

*Dott. Ing. Beatrice Carmassi*

*Prof. Ing. Massimo Losa*

*Prof. Ing. Luciano Caroti*

*Dott. Ing. Federico Menichini*

*Dott. Ing. Elvezia Cepolina*

*Dott. Ing. Elga Pellegrini*

## INDICE

<b>0. PREMESSE</b> .....	1
<b>1. VERIFICA DI FATTIBILITÀ TECNICO FERROVIARIA DELLA SOLUZIONE SOTTERRANEA</b> .....	5
1.1 FATTIBILITÀ GEOMETRICA	
1.1.1 <i>Andamento piano-altimetrico</i> .....	5
1.1.2 <i>La sezione</i> .....	8
1.1.3 <i>La fermata</i> .....	9
1.1.4 <i>Conclusioni</i> .....	11
1.2 FATTIBILITÀ REALIZZATIVA .....	12
<b>2. IL MANTENIMENTO DELL'ESERCIZIO DURANTE L'ESECUZIONE DEI LAVORI DELLA SOLUZIONE SOTTERRANEA</b> .....	13
<b>3. STIMA DEI COSTI DELLA SOLUZIONE SOTTERRANEA</b> .....	13
<b>4. SOLUZIONI IN SUPERFICIE</b> .....	15
<b>5. BENEFICI INDOTTI DALL'ELIMINAZIONE DEL PASSAGGIO A LIVELLO</b> .....	18
<b>APPENDICE</b>	
<b>A. ELEMENTI GEOMETRICI DEL TRACCIATO DELLA SOLUZIONE INTERRATA</b> .....	23
<b>B. REALIZZAZIONE DEL SITO WEB</b> .....	31
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	32

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE DELL'UNIVERSITÀ DI PISA

Direzione: Via Gabba, 22 – 56126 PISA – Tel. +39 (0)50 553658 – Fax +39 (0)50 830206 - C. Fisc. 80003670504, P. IVA 00286820501  
Sede di Vie e Trasporti: Via Diotisalvi, 2 – 56126 PISA – Tel. +39 (0)50 550421 – Fax +39 (0)50 553573

## 0. PREMESSE

La città di Altopascio (Lu) conta circa 10.000 abitanti e raccoglie numerosi insediamenti artigianali e di medie industrie (Fig. 1); si è sviluppata, in senso NW-SE, lungo la via Francesca Romea (uno dei rami della via Francigena di nota importanza storica che da oltralpe conduceva i pellegrini a Roma) e ha sempre costituito un nodo di passaggio per le comunicazioni che si svolgono nell'ampia area pianeggiante in cui la città è inserita.

Nel 1846 il Granduca di Toscana approvò il progetto presentato dalla “Società Anonima della Strada Ferrata da Lucca a Pistoia”. I lavori subito iniziati, raggiunsero Altopascio l'11 giugno 1848 e si conclusero a Pistoia il 6 giugno 1857 ove, congiungendosi alla Strada Ferrata Maria Antonia, costituiscono l'attuale completamento della linea a semplice binario Firenze – Pistoia – Lucca – Pisa . Tale opera suddivise l'area urbana in quattro quadranti e le relazioni fra i due quadranti superiori e i due inferiori risultò concentrata nel passaggio a livello (PL) posto fra la via Romea e la stessa linea ferroviaria.

Nel 1922 fu concepita con finalità turistiche, insieme alla “Milano-Laghi” e alla “Napoli- Pompei”, e negli anni successivi fu realizzata, per concessione della “Società Ing. Puricelli” l'autostrada a tre corsie “Firenze – Mare”. Inserita nel piano per la rete autostradale italiana approvato nel 1955 come “A11”, fu ampliata a quattro corsie negli anni successivi dalla “Soc. Autostrade”. Questa infrastruttura, mentre accentuò la suddivisione fra i quadranti superiori e quelli inferiori, non intercettò, sovrappassandola, la Via Romea.

Lo sviluppo delle attività e la diffusione della motorizzazione (1), non solo di interesse locale ma anche di attraversamento per rapporti interprovinciali ( in particolare per i veicoli commerciali) ha trovato nella presenza del *passaggio a livello* la causa di lunghe code veicolari che determinano disagi di comunicazione ai cittadini per il normale esercizio delle attività pubbliche e private in ambito urbano nonché interruzioni temporanee al flusso veicolare verso le arterie di collegamento maggiori che indirizzano verso altre destinazioni.

(1) Dalle valutazioni di traffico fornite dall'Ufficio Tecnico Comunale riguardanti i risultati di una campagna di indagine sui flussi veicolari condotta nel periodo Maggio \_ Giugno 2004, da Tages s.c.r.l., su alcuni nodi ed archi della rete stradale di interesse provinciale, ubicati nel territorio del Comune di Altopascio, è evidente la non omogeneità del traffico veicolare che gravita sul nodo in questione che richiederebbe, comunque, una alternativa esterna per l'attraversamento del traffico commerciale.

Fig. 1: Altopascio divisa dalla ferrovia



Questo fenomeno relativo alla circolazione è la causa, fra l'altro, del forte aumento dell'inquinamento atmosferico e acustico che insiste sui residenti degli edifici prospicienti via Romea che oggi presentano facciate degradate dai gas di scarico degli autoveicoli.

Nell'ambito del potenziamento della linea ferroviaria Pistoia – Lucca – Pisa è stato approvato dalle RFI il “*Progetto preliminare del corpo stradale per il raddoppio della linea ferroviaria Pistoia – Lucca – Pisa*” redatto dalla Sintagma s.r.l. e ne è stato predisposto il progetto definitivo.

L'intervento progettato (Tav. 1) ricade sostanzialmente lungo il tracciato esistente con solo una variante nel quadrante NW-W del territorio per consentire un aumento della velocità di percorrenza lungo la linea che, rispetto ai 140 km/h previsti lungo l'intero itinerario, prevede, nella tratta dell'attraversamento urbano, una limitazione a 130 km/h; **la stazione con tre binari viene confermata nella preesistente ubicazione e, in particolare, viene mantenuto in essere l'attuale passaggio a livello.**

L'Amministrazione Comunale di Altopascio, preoccupata che il predetto potenziamento della linea possa indurre un sensibile incremento del transito dei convogli ferroviari e, quindi, con l'aumento dei tempi di chiusura del passaggio a livello, un accentuarsi dei disagi già attualmente sopportati, ha ritenuto che gli interventi di potenziamento della linea costituissero (anche nel quadro generale delle politiche di RFI per l'eliminazione del passaggio a livello) una occasione non ripetibile per l'eliminazione di quello localmente esistente.

*Considerato che per la soppressione del passaggio a livello è, ovviamente, indispensabile che una delle due infrastrutture che si intersecano ( quella stradale e quella ferroviaria) debba portarsi ad una quota inferiore o superiore a quella dell'altra, l'Amministrazione ha in primo luogo constatato come, localmente, la Via Romea non possa essere portata a sovrappassare o sottopassare la linea ferroviaria a causa della contigua presenza degli edifici fra i quali si sviluppa e ai quali, comunque, deve assicurare l'accessibilità; e pertanto ha deciso di verificare la fattibilità di un interrimento della linea ferroviaria nell'attraversamento dell'ambito urbano anche in analogia a quanto previsto in altra località ubicata lungo la stessa linea.*

A questo scopo il Comune di Altopascio ha ritenuto opportuno avvalersi della collaborazione del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa con il quale ha in proposito stipulato in data 08/01/2005 un contratto avente per oggetto uno studio che si articolasse nel modo seguente:

1. Individuazione di una ipotesi progettuale di larga massima per una modifica del tracciato ferroviario che consenta sia l'interrimento che il raddoppio del binario del tratto in attraversamento dell'abitato di Altopascio (Lu);
2. Definizione delle caratteristiche generali di una modalità idonea a ottenere un intervento di interrimento e raddoppio senza implicare alcuna interruzione del servizio ferroviario;
3. Stima di massima dei costi delle opere previste;
4. Individuazione preliminare della fattibilità e dei costi di eventuali soluzioni alternative.
5. Benefici indotti dalla eliminazione del passaggio a livello

Venne previsto, nella Convenzione, che la responsabilità del procedimento venisse affidata al Prof. Ing. Antonio Pratelli per il Dipartimento e al Dott. Arch. Lucia Flosi, per il Comune di Altopascio.

A completamento di quanto riportato nei due rapporti intermedi sullo stato di avanzamento dei lavori già trasmessi all'Amministrazione Comunale e che sono stati oggetto di due presentazioni nella sala del Consiglio Comunale alla presenza di rappresentanti dell'Amministrazione viene redatta la presente relazione che costituisce una sintesi delle valutazioni svolte presso il predetto Dipartimento dal gruppo di lavoro costituito da:

Dott. Ing. Beatrice Carmassi

Prof. Ing. Massimo Losa

Prof. Ing. Luciano Caroti

Dott. Ing. Federico Menichini

Dott. Ing. Elvezia Cepolina

Dott. Ing. Elga Pellegrini

# 1. VERIFICA DI FATTIBILITA' TECNICO FERROVIARIA DELLA SOLUZIONE SOTTERRANEA

## 1.1 Fattibilità geometrica

### 1.1.1 Andamento piano – altimetrico

Nell'individuare un possibile tracciato per la soluzione in sotterraneo (Tav. 2) si è dovuto tenere conto di fattori vincolanti come :

- L'opportunità di mantenere una distanza di almeno 5 m tra scavo ed eventuali edifici (Fig. 2);
- Il vincolo di dover conservare la quota attuale della ferrovia in prossimità del torrente Tassinai.

In particolare, la presenza di questo corso d'acqua ad una distanza di poco più di 1400 m dall'edificio di stazione, ha influenzato notevolmente lo studio del tracciato. Infatti la quota della linea ferroviaria attuale in prossimità del torrente è di 19,6 m.s.l.m. e, per questo motivo, la rampa di collegamento deve permettere di superare un dislivello di quasi 15 metri; per mantenere la sua pendenza longitudinale ad un valore accettabile (15‰) è stato quindi necessario spostare il più possibile il tratto orizzontale del tracciato, dove è localizzato il binario di stazionamento, verso ovest in modo da poter aumentare la lunghezza della rampa e consentire la risalita in superficie prima di arrivare all'attraversamento del corso d'acqua.

Risulta però ridotto lo spazio (circa 280 m) a disposizione per la livelletta orizzontale e ciò ha condizionato sia la scelta del piano di stazionamento, sia lo sviluppo longitudinale dei marciapiedi; in particolare non vi è lo spazio sufficiente per inserire i deviatori che consentano di instradare il treno in un binario deviato di lunghezza adeguata allo stazionamento di un treno viaggiatori di normale composizione.

Questa limitazione impone, nel rispetto dei regolamenti RFI, che il servizio offerto localmente non possa essere considerato come quello di una “**stazione**” bensì come una “**fermata**”.

Più nel dettaglio, l'**andamento planimetrico**, del nuovo tracciato individuato si mantiene, iniziando da Est, in rettilineo per poco più di 200 m, quindi incontra la prima curva circolare di raggio, riferito all'asse di due binari, pari a 922 m che si sviluppa per circa 190 m. Tra rettilinei e curve circolari sono

stati previsti raccordi con archi di parabola cubica in modo da variare gradualmente la curvatura e ridurre il contraccolpo ai valori consentiti. Il valore del raggio della curva circolare è stato modificato rispetto a quello della ferrovia esistente in cui si riscontrava un valore di 1000 m.

*Dal solo punto di vista planimetrico la velocità di progetto di questa parte di tracciato sarebbe di 140 km/h.*

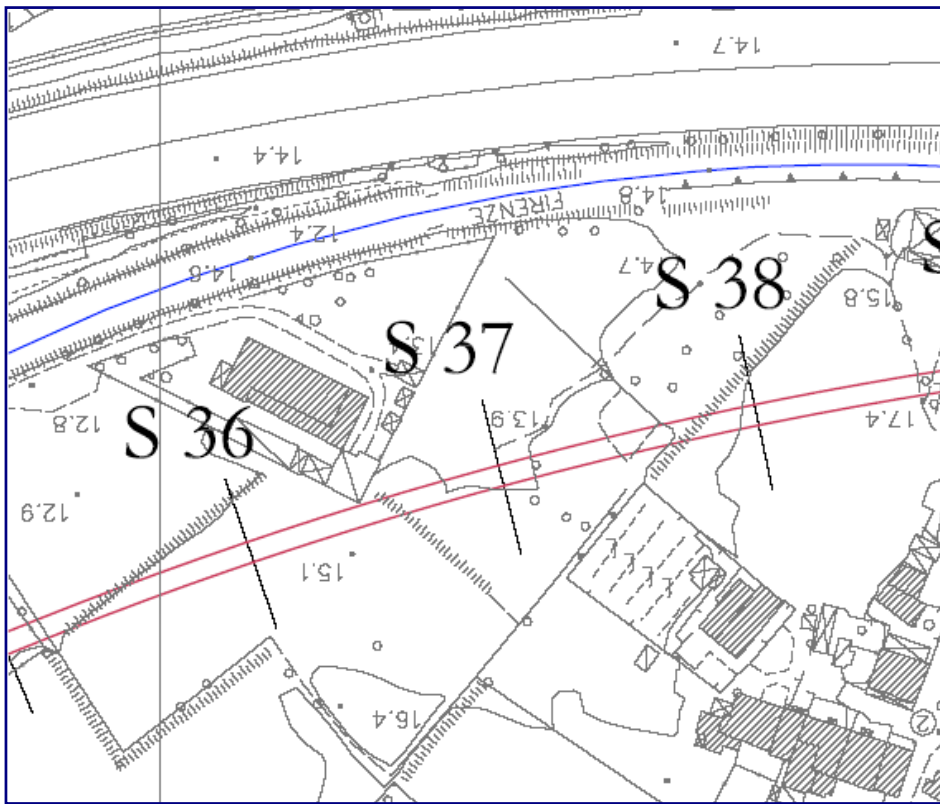
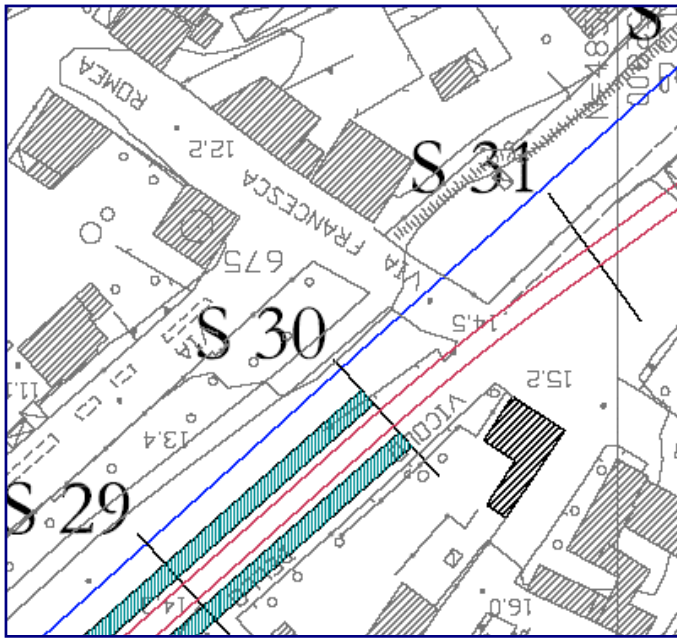
La curva è seguita da un rettilineo di circa 512 m, quasi a metà del quale inizia la livelletta orizzontale, di sviluppo pari a 280 m, che corrisponde a parte del tratto di ferrovia che risulterà completamente interrato al di sotto dell'attuale zona di stazione e passaggio a livello, che è complessivamente lungo 450 m.

Dopo il rettilineo si ha una curva circolare di raggio medio pari a circa 800 m che, rispetto a quello presente lungo il tracciato esistente, ha un valore quasi doppio, consentendo, *sempre con riferimento all'andamento planimetrico*, di poter contare su una velocità di progetto pari a 130 km/h. Il tracciamento di questa curva, posizione e raggio, è stato condizionato dalla necessità di mantenere una distanza adeguata da tre edifici molto vicini alla sede ferroviaria come si può osservare dalla Fig. 2.

**L'andamento altimetrico**, nei primi 150 m dello sviluppo in curva si mantiene in orizzontale; successivamente, per mantenere inalterata l'attuale quota di Via Romea, si ha la rampa a pendenza longitudinale del 15‰ che permette di ricollegare la parte interrata alla ferrovia in superficie.

Il tracciato individuato è rappresentato, sia dal punto di vista planimetrico che da quello altimetrico nell'elaborato grafico fuori scala, riportato nella Tav. 2.

Fig. 2: Punti critici: vicinanza di edifici civili alla sede ferroviaria



### 1.1.2 La sezione

Per la definizione della sezione in sotterraneo è indispensabile tenere conto del profilo degli ostacoli, riferito ad una sezione trasversale di binario, rappresentato dalla linea formata dalle estremità degli ostacoli più vicine agli assi del binario.

Il profilo minimo degli ostacoli (P.M.O) standard rappresenta il profilo degli ostacoli più restrittivo relativo a tratte di linea significativamente estese; quindi non è necessariamente pari al più ristretto in senso geometrico.

La posizione che devono avere gli ostacoli fissi e quindi il P.M.O. è funzione, per ciascuna sagoma, del raggio delle curve, delle sopraelevazioni e delle velocità.

Quanto sopra consegue dall'adozione, in normativa, dei criteri dettati dalle Fiche UIC 505 per i quali le distanze minime che devono intercorrere fra veicolo ed ostacolo non sono stabilite in misura fissa ma sono variabili in base ai parametri accennati.

La sagoma limite, o Gabarit, è la figura entro la quale deve essere contenuta la sezione trasversale di un veicolo. Essa costituisce il contorno di riferimento, all'interno del quale il costruttore del veicolo deve apportare le riduzioni di ampiezza di competenza (come prescritto dalla normativa Fiche) ed all'esterno del quale potranno essere posizionati, alle distanze stabilite in base alle stesse Fiche, gli ostacoli lungo la linea. La sagoma limite non è uguale per tutte le reti ferroviarie, tuttavia l'UIC ha definito una particolare sagoma limite internazionale denominata Gabarit C.

La scelta del profilo minimo degli ostacoli fissi attribuibile ad una linea e di conseguenza, la transitabilità delle sagome con esso compatibile, costituisce uno degli elementi essenziali per la caratterizzazione funzionale della stessa linea. Tanto maggiore è il Gabarit ammesso tanto migliori saranno le potenzialità della linea.

I profili minimi standards FS sono 5:

P.M.O. n°1 compatibile con la sagoma G1

P.M.O. n°2 compatibile con la sagoma B

P.M.O n°3 compatibile con la sagoma B plus

P.M.O. n°4 compatibile con la sagoma C ed è da adottare per le ristrutturazione delle linee esistenti

P.M.O n°5 compatibile con la sagoma C ed è da adottare su nuove linee.

Poiché si tratta di un nuovo tracciato, in questa relazione è stato previsto il P.M.O. n°5 il quale ammette le sagome ed i trasporti di tutti e quattro gli altri P.M.O. e qualunque trasporto combinato senza alcuna particolare limitazione di velocità.

Nel caso in esame si distinguono due tipologie di sezione: quella per la *ferrovia interrata* e quella relativa allo *stazionamento interrato*.

In entrambi i casi, esse sono costituite da uno scatolare a sezione rettangolare, delimitato inferiormente da un solettone di base, superiormente da un solettone di copertura, di spessore ipotizzato pari a circa 1m e lateralmente da strutture previste in prima approssimazione di pari spessore. Per lo stazionamento la larghezza dello scatolare risulta di circa 17 m mentre si riduce a meno di 12 m nei tratti interrati nelle trincee di approccio, per i quali è necessario collocare ai lati della sede ferroviaria solo una banchina pedonale per il transito del personale di servizio larga 50 cm.

### 1.1.3 La fermata

Lo schema planimetrico della nuova fermata interrata è stato condizionato sia dai vincoli geometrici del sito sopra elencati e che sono emersi durante il questo studio, sia dalle prescrizioni della Normativa di cui si riportano le più significative per il caso esaminato:

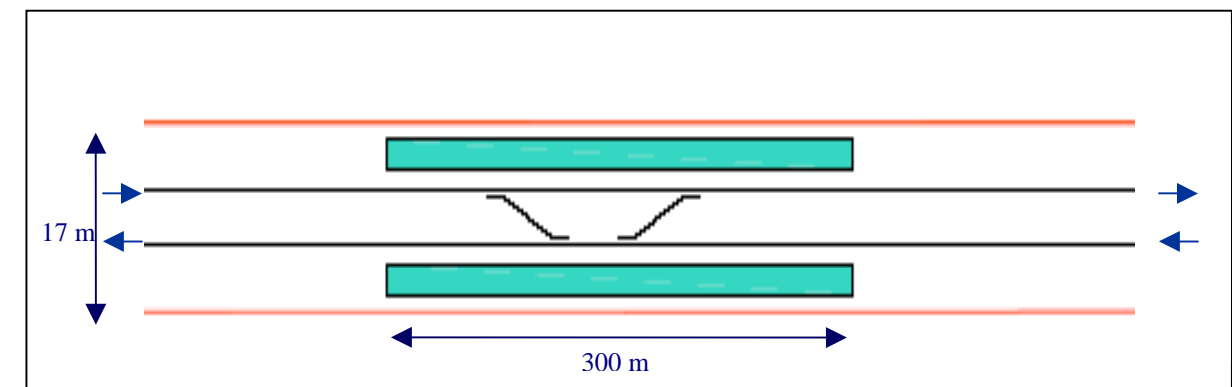
- Non devono esistere, salvo casi eccezionali, binari di stazione con pendenza superiore al 1-2 per mille;
- Nelle stazioni di linee a doppio binario quelli di corretto tracciato devono essere due, uno per ogni senso di marcia;
- Occorre evitare con ogni possibile cura l'inserzione di scambi in curve con sopraelevazione. Nel caso in cui ciò sia impossibile dovranno essere adottate curve con sopraelevazione non superiore ai 6 cm;
- I piani di posa dei deviatori non devono essere interessati dai raccordi altimetrici dei cambi di livelletta della linea ed è consigliabile prevedere tra l'inizio di questi ultimi e i deviatori stessi, un franco di 4-5 m per compensare eventuali slittamenti in sede di tracciamento.

Tenendo conto delle predette limitazioni imposte dalla planimetria, lo schema che è risultato tecnicamente fattibile per la stazione interrata è composto dai due binari di corsa, i quali rappresentano la prosecuzione dei binari di linea all'interno della stazione e che, non presentando

deviazioni in ingresso e in uscita, sono quindi da considerarsi di *corretto tracciato*. Non essendovi binari in deviato questo schema è conforme alle norme per il servizio di *"fermata"*.

La presenza della comunicazione tra i due binari può consentire soltanto l'instradamento dei convogli sul binario illegale nel caso di interruzione di quello legale, ma non è possibile eseguire precedenza tra treni nello stesso senso di marcia né incroci tra treni in direzioni opposte nel caso di interruzione di un binario.

Fig. 3: Schema dell'opera in corrispondenza della fermata



Nella Fig. 3 è evidenziato lo schema, non in scala, della nuova stazione che permette l'immediato esame di quali siano i movimenti e le manovre che i treni potranno eseguire nella fermata; vi sono rappresentati i due binari (ciascuno con un'unica linea) e le comunicazioni tra essi che sono state previste costituite da due deviatori S. 60 UNI/400/0.094, che permettono una velocità in deviato pari a 60 km/h, a differenza degli attuali deviatori che in molti casi riducono la velocità a 30 km/h, intervallati da una serraglia.

Vi è anche evidenziato l'ingombro in senso trasversale dello scavo necessario per questo tipo di stazionamento (circa 17 m compresi i diaframmi laterali) e sono riportati anche i due marciapiedi che sono stati ipotizzati di lunghezza 300 m e di larghezza 3.5 m stabilita in base ad una serie di vincoli e prescrizioni a cui occorre attenersi nella progettazione dei marciapiedi di stazione quali:

- la necessità che ogni marciapiede presenti una striscia di sicurezza, di colore giallo, larga 12 cm e parallela al ciglio, che delimita la zona in cui è pericoloso sostare e che può essere impegnata dal pubblico solo per l'accesso alle vetture ferme; essa deve avere dal ciglio una distanza di sicurezza che è variabile in relazione alla velocità della linea;

- la prescrizione di dividere funzionalmente il marciapiede in tre fasce d'uso tra cui l'anzidetta fascia di sicurezza, una fascia di transito e una fascia di sosta nella quale può anche essere presente un ostacolo. Lo spazio compreso tra la striscia di sicurezza e lo stesso ostacolo deve essere almeno pari a 90 cm per includere un viaggiatore con bagaglio o il transito di una sedia a ruote per portatori di handicap.

Inoltre si è tenuto conto della presenza degli elementi di collegamento verticale tra il piano del marciapiede e la superficie: per consentire l'accesso ai marciapiedi interrati è stata prevista su entrambi la realizzazione di scale ad un'unica rampa, larghe 150 cm, ciascuna composta da 45 scalini (35 x 18 cm) e di ascensori (150 x 150 cm).

E' stato previsto il cosiddetto "marciapiede alto" che è stato introdotto di recente secondo un nuovo standard europeo: l'altezza del marciapiede classico è 250 mm (H250) mentre l'altezza del nuovo marciapiede è di 550 mm (H550) secondo la Fiche UIC F41. Esso favorisce l'accesso dei viaggiatori al treno ed ha un gradino di servizio che, oltre al rispetto della sagoma limite cinematica internazionale, risulta utile per la salita e la discesa del personale di servizio e per interventi di controllo del sottocassa.

Come previsto dalle RFI si è considerata una distanza nominale di 1681 mm tra l'asse del binario e il ciglio del marciapiede.

Oltre alla *fermata interrata* è previsto di realizzare in superficie due *binari tronchi* da destinare al ricovero dei convogli ed ai locomotori di emergenza e soccorso.

Per quanto **riguarda il fabbricato** viaggiatori si considera il riutilizzo di quello esistente per cui gli elementi di collegamento verticale dovranno essere collocati esternamente ad esso.

#### 1.1.4 Conclusioni

*Come emerge dai paragrafi precedenti risulta verificata la fattibilità del tracciato individuato nei riguardi della sua possibilità di inserimento plano-altimetrico negli spazi disponibili pur con le limitazioni che ne risultano dal prevedere una "fermata" piuttosto che una "stazione".*

## 1.2 Fattibilità realizzativa

L'Ufficio Tecnico del Comune di Altopascio ha reso disponibile una indagine eseguita dallo Studio di Geologia Barsanti – Sani dell'Agosto 1987 con successive integrazioni del 2004.

Per quanto riguarda la *stratigrafia* gli unici elementi che ne emergono sono:

- 1) Argille, argille sabbiose e sabbie; le stratigrafie di pozzi realizzati nell'ambito comunale segnalano le argille a profondità superiori ai 200 m;
- 2) Conglomerati, ciottoli ed argille; di uno spessore che non supera i 30-40 m;
- 3) Sabbie, sabbie argillose, argille e ciottoli; lo spessore della formazione è variabile.

Nell'ambito della coltre sabbiosa superficiale i risultati dell'indagine riportata nello studio suddetto evidenziano la presenza di una *falda superficiale* avente una quota piezometrica pari a circa 11 m.s.l.m..

Tali dati non possono offrire alcun elemento tecnico che possa consentire di esprimere specifiche ipotesi realizzative se non quelle di dover comunque ovviare a problemi di sottospinta idraulica e di scavo in presenza di acqua.

*La tecniche attualmente disponibili (più o meno onerose) consentono comunque di poter esprimere parere favorevole nei riguardi della fattibilità dell'opera.*

## 2. IL MANTENIMENTO DELL'ESERCIZIO DURANTE L'ESECUZIONE DEI LAVORI DELLA SOLUZIONE SOTTERRANEA

Lo studio delle varie fasi per l'esecuzione del progetto riveste ovviamente un ruolo fondamentale in quanto si deve comunque garantire il servizio senza paralizzare la circolazione ferroviaria e viaria della zona interessata.

L'esame degli spazi disponibili ai lati della linea esistente e delle modifiche al tracciato attuale riportate nel progetto RFI per il raddoppio, ha indirizzato alla scelta di affiancare la linea interrata individuata a quella esistente e di utilizzare questa ultima per la circolazione ferroviaria nella "fase transitoria", cioè per tutto l'arco di tempo in cui viene realizzato l'intero lavoro di interramento.

Ne risulta che i binari della nuova fermata e dei tratti di piena linea in trincea saranno traslati rispetto all'attuale situazione di circa metri 10.

*Si conferma che la fattibilità dell'opera è assicurata, pur nella ristrettezza degli spazi, anche nei riguardi del mantenimento dell'esercizio durante i lavori.*

## 3. STIMA DEI COSTI DELLA SOLUZIONE SOTTERRANEA

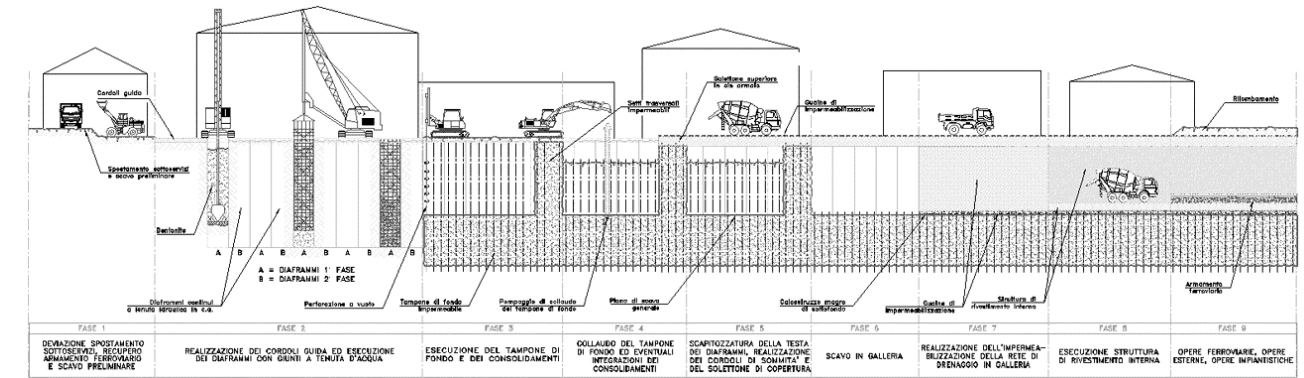
In mancanza di notizie significative di carattere geotecnico non è stata possibile, sia pur di larghissima massima, una previsione sia della tecnica costruttiva sia in particolare del dimensionamento delle opere strutturali.

Una stima dei costi dell'opera dell'interramento per la ferrovia nella tratta urbana di Altopascio è stata pertanto individuata per analogia ad altri progetti di interramento a carattere ferroviario.

Il caso che più si avvicina per tipologia di intervento al caso in esame è quello realizzato lungo la linea ferroviaria Torino – Ceres nella tratta urbana di Caselle Torinese.

Il progetto di Torino prevede una galleria artificiale di lunghezza pari 630 m con due rampe di accesso in trincea. La tecnica di scavo utilizzata è la tecnica del "Cut and Cover", preceduta dalla realizzazione di un tampone di fondo in jet-grouting per contrastare l'effetto della falda. (Fig. 4).

Fig. 4: Tecnica di scavo per l'interramento della linea Torino-Ceres



### fase 1)

- scavo e getto dei cordoli guida
- spostamento dei sottoservizi
- recupero dell'armamento ferroviario

### fase 2)

- scavo per posizionamento dei diaframmi a mezzo di benna verticale
- riempimento con fango bentonitico di perforazione fino al livello stradale
- immissione dell'armatura metallica
- getto di cls ed espulsione dei fanghi

### fase 3)

- esecuzione del tampone di fondo e dei consolidamenti

### fase 4)

- collaudo del tampone di fondo
- eventuali integrazioni dei consolidamenti

### fase 5)

- costruzione del solettone di copertura in calcestruzzo armato

### fase 6)

- scavo in galleria

### fase 7)

- impermeabilizzazione e rete di drenaggio

### fase 8)

- realizzazione dell'opera di rivestimento interna

### fase 9)

- opere ferroviarie e impiantistiche



Per analogia a questa opera, il costo di quella in esame potrebbe essere stimato in 62 milioni di euro. Nel quadro del suo potenziamento, lungo la stessa linea ferroviaria Pistoia – Lucca, è previsto un intervento di caratteristiche analoghe a quello individuato per Altopascio il cui costo ammonta a circa 60 milioni di euro.

*Se ne può ragionevolmente concludere che per l'intervento di interrimento individuato, il costo di realizzazione possa ammontare a circa 55 – 60 Milioni di Euro.*

#### **4. SOLUZIONE IN SUPERFICIE**

Come previsto dalla convenzione viene qui di seguito illustrata l'individuazione di soluzioni alternative non interrate.

*Le soluzioni di superficie si configurano come uno spostamento dell'attuale linea ferroviaria verso l'autostrada in modo da realizzare un unico corridoio infrastrutturale che, ponendo in stretta adiacenza le due infrastrutture (ferrovia e autostrada) nel tratto interessato dal passaggio a livello, evita la doppia frammentazione del territorio e consente di sottopassarle entrambe in un unico allineamento della Via Romea.*

In particolare, qualora si prenda in considerazione una soluzione in superficie, l'eliminazione dell'interferenza tra le due infrastrutture può avvenire soltanto mediante un sottopassaggio stradale che, per motivi di ingombro, non può essere realizzato sottopassando la ferrovia nell'attuale sedime, a meno che la stessa non venga sopraelevata ( soluzione non praticabile); in alternativa, è possibile realizzare il sottopassaggio stradale in seguito allo spostamento della ferrovia verso l'autostrada dove il piano viabile di Via Romea è già sufficientemente basso (12 m.s.l.m.) da consentire di sottopassare anche la linea ferroviaria ricorrendo ad un modestissimo innalzamento dell'attuale quota del piano del ferro di circa 1 m.

A tal proposito, è opportuno sottolineare che la soluzione sotterranea, se da un lato consente di ricucire il territorio in corrispondenza del punto di localizzazione della fermata, (per uno sviluppo pari a circa 450 m) dall'altro determina comunque una frattura nei tratti delle rampe in trincea che, come già descritto nei precedenti paragrafi, hanno uno sviluppo pari a 750 m ognuna.

Per la soluzione di superficie sono state individuate due possibili alternative:

- La prima, a parità di prestazione di esercizio con la soluzione in sotterraneo, consentirebbe la realizzazione di una fermata in affiancamento all'autostrada, che comporta lo spostamento dell'attuale stazione di circa 100 m verso Sud – Ovest.
- La seconda consentirebbe invece la realizzazione di una vera e propria stazione, con uno o due binari in deviato oltre a quelli di corretto tracciato, e con possibilità di eseguire precedenza tra treni nello stesso senso di marcia e senza determinare limitazioni alla potenzialità della linea; questa alternativa richiederebbe però lo spostamento dell'attuale stazione di circa 450 m verso Nord Est.

Entrambe le soluzioni, consentirebbero di liberare l'attuale sedime ferroviario, che potrebbe così avere diversa destinazione ed essere utilizzato anche per l'accessibilità alla stazione.

La realizzazione delle soluzioni di superficie comporta la demolizione dei due edifici per civile abitazione posti in prossimità dell'autostrada lungo la Via Romea.

Per le soluzioni di superficie la descrizione del tracciato, anziché da Est come nel caso della soluzione in sotterraneo, per una più immediata comprensione, inizierà da Ovest.

##### **Prima alternativa di superficie**

*Dal punto di vista planimetrico* iniziando da Ovest, il nuovo tracciato si sviluppa su quello esistente fino a quando quest'ultimo è in affiancamento all'autostrada; da questo punto in poi abbandona il vecchio sedime per restare in affiancamento all'autostrada, con l'asse del binario più vicino ad una distanza di 12 m dal margine esterno dell'autostrada con una curva circolare avente raggio pari a 750 m e sviluppo pari a circa 530 m.

Al termine del tratto curvilineo, in prossimità della Via Romea, il tracciato si sviluppa in rettilineo, con una lunghezza pari a 400 m, dove è prevista l'ubicazione della fermata; la successiva curva ha lo stesso raggio pari a 750 m, sviluppo pari a circa 500 m e consente di collegare il nuovo tracciato a quello esistente mediante un rettilineo di lunghezza pari a circa 200 m.

*Dal punto di vista altimetrico*, sempre partendo da Ovest (Tav. 3), il nuovo tracciato si rialza rispetto a quello esistente con una livelletta avente pendenza pari a circa 6 ‰ e lunghezza pari a circa 712 m, che consente di raggiungere la quota di 18,7 m.s.l.m.; dopo la fermata, dove ovviamente il binario è orizzontale, la linea si raccorda a quella esistente, che è a quota 17,5 m.s.l.m..

La combinazione dei valori dei raggi e delle pendenze longitudinali consentono una velocità di transito dei convogli in Rango A pari a 120km/h.

### **Seconda alternativa di superficie**

*Dal punto di vista planimetrico* iniziando sempre da Ovest (Tav. 4 A), il nuovo tracciato si sviluppa su quello esistente, in modo analogo alla prima soluzione fino a quando quest'ultimo è in affiancamento all'autostrada, per poi abbandonare il vecchio sedime restando in affiancamento all'autostrada, con una curva circolare avente raggio pari a 750 m e sviluppo pari a 480 m. Al termine del tratto curvilineo, in prossimità della Via Romea, il tracciato si sviluppa in rettilineo, con una lunghezza pari 176 m, e si collega, mediante la successiva curva avente raggio pari a 700 m al rettilineo, avente lunghezza pari a 600 m, dove è ubicata la nuova stazione a tre binari (due di corretto tracciato più uno in deviato).

Oltre la stazione, il nuovo tracciato si raccorda a quello esistente con due curve, una sinistrorsa e una destrorsa, di raggio pari a 700 m e 750 m e di sviluppo rispettivamente pari a 300 m e 140 m.

*Dal punto di vista altimetrico*, sempre partendo da Ovest, il nuovo tracciato si rialza rispetto a quello esistente con una livelletta avente pendenza pari al 6 ‰, che consente di raggiungere la quota di 18,7 m.s.l.m.; dopo la stazione dove ovviamente il binario è orizzontale, la linea si raccorda a quella esistente, che è a quota 17,5 m.s.l.m..

La combinazione dei valori dei raggi e delle pendenze longitudinali consentono una velocità di progetto pari a 120km/h.

*A completamento della seconda alternativa di superficie è opportuno segnalare la possibilità di ottenere un tracciato con velocità di progetto pari a 140 km/h, sostituendo le curve ad Ovest, aventi raggio pari a 750 m, con due curve successive di raggio pari a 900 m (Tav 4 B).*

Con tale soluzione, partendo dalla nuova stazione, avente sviluppo pari a 600 m, il nuovo tracciato si raccorda a quello esistente con una ampia curva avente raggio pari a 2350 m.

Questa soluzione comporta uno spostamento dell'attuale fabbricato viaggiatori di circa 750 m in direzione Nord – Est.

Dal punto di vista altimetrico, questa soluzione non si discosta da quella descritta al paragrafo precedente.

Per tutte le soluzioni di superficie, essendo il piano del ferro a circa 5,5 – 6 m al di sopra dell'attuale piano di campagna, è opportuno ricorrere ad una soluzione in viadotto che consente fra l'altro di mantenere in comunicazione diretta, sul piano di campagna, le due parti del territorio attraversato dalla ferrovia.

Per una linea a doppio binario in viadotto attrezzata il costo può essere stimato in circa 11.200 euro/ml.

Tenendo conto che gli sviluppi delle soluzioni oscillano tra i 2 e i 2,3 km, i costi variano da 25 milioni di euro per la soluzione con la fermata (Tav. 3) e a 30 - 31 milioni di euro per le soluzioni con la stazione (Tav. 4).

## **5. BENEFICI INDOTTI DALLA ELIMINAZIONE DEL PASSAGGIO A LIVELLO**

In generale, i benefici che si possono ottenere con i vari tipi di interventi con l'eliminazione del passaggio a livello sono riconducibili a:

- Riduzione della congestione e dei tempi di attesa degli utenti stradali;
- Riduzione delle emissioni inquinanti dei veicoli fermi in attesa al passaggio a livello ed al vicino semaforo su Via Romea;
- Riduzione del rumore dei veicoli in attesa al passaggio a livello ed al semaforo.

Si può notare come tali benefici riguardino principalmente la collettività e l'ambiente in senso generale, ovvero siano benefici indiretti, e pertanto difficilmente stimabili in termini monetari.

*Si possono, tuttavia, fare alcune considerazioni a livello qualitativo. Eliminando il passaggio a livello, oltre a ricucire il territorio del comune di Altopascio che attualmente è diviso in due dalla ferrovia, chiaramente non si provocherebbe più, anche al semaforo adiacente, la formazione della coda di veicoli in attesa dell'apertura del passaggio a livello. Ciò consentirebbe di ridurre sia la congestione, rendendo la circolazione più scorrevole, sia le emissioni inquinanti, che notoriamente*

sono maggiori a veicolo fermo, sia l'emissione del rumore, considerando soprattutto quello prodotto in fase di frenata e in fase di partenza.

Può essere invece stimato il valore monetario corrispondente al tempo perso attualmente dagli utenti in attesa al passaggio a livello chiuso, che verrebbe risparmiato in caso di eliminazione del passaggio a livello medesimo. Per potere stimare tale valore monetario del tempo speso in attesa dagli utenti è necessario:

- valutare il tempo medio di chiusura del passaggio a livello, il quale è stato stimato mediante un opportuno rilievo sperimentale svolto in data 29/03/2005;
- analizzare sia i dati di traffico ferroviario disponibili dall'orario giornaliero della linea, necessari a stimare un tempo medio di chiusura giornaliero del passaggio a livello, sia i dati di traffico veicolare riportati negli Allegati all' "Indagine sui flussi veicolari nei Comuni di Altopascio e Porcari" del Maggio – Giugno 2004, per determinare il volume di traffico giornaliero che transita su Via Francesca Romea in termini di veicoli leggeri e pesanti;
- considerare due valori monetari dell'unità di tempo distinti, uno per i veicoli leggeri, l'altro per i veicoli pesanti, i quali sono stati di recente utilizzati per l'analisi benefici - costi del Lotto "0" della Variante Aurelia nel tratto compreso fra le località del Maroccone e Chioma.

In primo luogo si è proceduto a stimare il tempo medio di attesa degli utenti, rilevando sperimentalmente il tempo medio di chiusura del transito a livello nel caso di passaggio sia di un treno passeggeri che merci. Pertanto conoscendo il numero di treni, passeggeri e merci, passanti giornalmente sulla linea, si è determinato il tempo medio giornaliero di chiusura del passaggio a livello; in questa valutazione sono stati considerati solo i treni diurni, ovvero che transitano da Altopascio fra le ore 7:00 e le ore 23:00, facendo riferimento ad una giornata di sedici ore. Il numero medio giornaliero di veicoli costretti ad attendere al passaggio a livello chiuso si determina moltiplicando il volume di traffico giornaliero transitante in Via Francesca Romea per la probabilità di trovare il passaggio a livello chiuso, la quale è data dal rapporto fra il tempo medio giornaliero di chiusura e le sedici ore della giornata. Pertanto il tempo medio giornaliero di attesa degli utenti viene determinato come prodotto del numero medio di veicoli fermati per il tempo medio di attesa, il quale è assunto pari alla metà della media pesata dei tempi di chiusura del passaggio a livello i cui pesi sono il numero di treni passeggeri e merci passanti fra le 7:00 e le 23:00. I risultati del procedimento su descritto sono riportati passo dopo passo nella tabella seguente.

Tempo medio di chiusura per treno passeggeri	3,2 min.
Tempo medio di chiusura per treno merci	4 min.
Numero treni passeggeri al giorno (diurni )	40
Numero treni merci al giorno (diurni)	18
Tempo medio giornaliero di chiusura (16 ore)	200 min.
Probabilità di trovare il passaggio al livello chiuso	0,208
Volume di traffico giornaliero	15.152 veic.
Numero medio di veicoli fermati al giorno	3.157
Tempo medio di attesa di un veicolo fermato	1' 40''
<b>Tempo globale di attesa giornaliero degli utenti</b>	<b>90h 40'</b>

Stabilito il numero di giornate lavorative di un anno, si può pertanto determinare il tempo globale d'attesa annuo degli utenti come prodotto del tempo globale di attesa giornaliero per il numero di giorni lavorativi di un anno. Inoltre il tempo globale d'attesa annuo degli utenti può essere stimato distintamente per i veicoli leggeri e per i pesanti, utilizzando le stesse percentuali in cui è diviso il volume di traffico considerato, ovvero 85% di veicoli leggeri pari a 12.879 e 15% di veicoli pesanti pari a 2.273. Ciò consente di valutare il valore monetario del tempo globale annuo d'attesa tenendo conto sia di un differente valore monetario dell'unità di tempo (V.T.), sia di un diverso coefficiente di occupazione, per ciascuna delle due tipologie di veicoli. In particolare i coefficienti di occupazione utilizzati derivano dai dati statistici elaborati e pubblicati nel "Conto Nazionale dei Trasporti". In questo modo si è stimato il costo annuale del tempo d'attesa attualmente pagato dagli utenti a causa della presenza del passaggio a livello; sono stati considerati due casi differenti in base al numero di giornate lavorative di un anno stabilite, in modo da valutare un intervallo di valori del costo del tempo d'attesa piuttosto che fornire un unico valore.

I risultati così ottenuti sono riportati nella tabella sottostante.

	Veicoli leggeri	Veicoli pesanti	Veicoli leggeri	Veicoli pesanti
Numero gg. lavorativi dell'anno	200		250	
Tempo d'attesa (ore/giorno)	15.420	2.721	19.276	3.402
Coefficiente di occupazione	1,6	1,1	1,6	1,1
V.T. €/ora	12,91	25,82	12,91	25,82
<b>COSTO €/anno</b>	<b>395.797</b>		<b>494.746</b>	

Dalla tabella si nota che il costo diretto attualmente pagato dagli utenti per il tempo perso in attesa al passaggio a livello chiuso è notevole e *tenderà senz'altro ad aumentare con il potenziamento della linea*; pertanto, l'eliminazione del passaggio a livello esistente in Via Francesca Romea produrrebbe una notevole riduzione del costo del tempo di attesa degli utenti.

Concludendo, considerato che la maggior parte dei benefici individuati siano indiretti e, soprattutto, sono difficilmente quantificabili in termini monetari, potrebbe essere interessante valutare e confrontare le varie soluzioni utilizzando metodi di analisi multi - criteria piuttosto che una analisi benefici costi.

## APPENDICE

### A. ELEMENTI GEOMETRICI DEL TRACCIATO DELLA SOLUZIONE INTERRATA

Il tracciato di una ferrovia è formato da una successione di rettifili e di curve circolari con relativi raccordi di transizione realizzati in genere con archi di parabola cubica. Per bilanciare l'azione della forza centrifuga che si ha quando viene percorsa una curva, si provvede al rialzamento della rotaia esterna rispetto a quella interna che mantiene l'andamento altimetrico di progetto.

Questo è necessario perché la forza centrifuga potrebbe portare i bordini delle ruote a premere contro la rotaia esterna con sforzi tali da lasciar temere:

- Lo slargamento della curva per lo scorrimento delle traverse nella massicciata;
- Il ribaltamento della rotaia esterna per strappamento dell'attacco;
- Lo svio del veicolo per salita del bordino sul fungo della rotaia esterna alla curva;
- Il consumo anormale, comunque, del bordino e della rotaia esterna.

A quanto sopra occorre aggiungere il pericolo del ribaltamento dell'intero veicolo, il cui baricentro è sempre più alto del piano di rotolamento, la perdita d'equilibrio e comunque la riduzione del comfort dei viaggiatori.

L'entità del rialzamento della rotaia esterna dipende dal raggio della curva e dalla velocità con la quale essa viene percorsa: il rialzamento aumenta con l'aumentare della velocità di percorrenza e con il diminuire del raggio.

La sopraelevazione teorica fa sì che la componente tangenziale del peso compensi totalmente la forza centrifuga.

Nella realtà si crea un rialzamento che non compensa tutta l'accelerazione centrifuga ma solo una parte: la sopraelevazione effettivamente utilizzata tiene conto che la velocità di marcia può essere inferiore a quella massima di progetto e dei possibili rallentamenti e fermate in linea. Quindi il suo valore diventa funzione anche dell'entità dell'accelerazione centrifuga ammessa.

Sulla rete F.S. tale "accelerazione non compensata" viene assunta in genere non superiore al seguente valore:

$$a_{nc} = 0,6 \text{ m/s}^2$$

mentre la sopraelevazione massima ammessa è:

$$h_{\max} = 16 \text{ cm.}$$

Per linee con velocità inferiori a 160 km/h come quella studiata si utilizza la seguente espressione in cui si lega il raggio minimo della curva ammesso dalla velocità di progetto con questa e con la sopraelevazione:

$$R_{\min} := \frac{V_{\max}^2}{3.6^2 \cdot \left( 0.6 + \frac{h_{\max}}{150} \cdot g \right)}$$

dove:  $V_{\max}$  è la velocità massima ammessa sulla linea

$R_{\min}$  è il raggio minimo della curva circolare ammesso sulla  
linea

$h_{\max}$  è la sopraelevazione massima ammessa

$g$  è l'accelerazione di gravità:  $9.81 \text{ m/s}^2$

$\frac{h_{\max}}{150} g$  è la componente dell'accelerazione di gravità sul piano di rotolamento

$s = 150 \text{ cm}$  è lo scartamento

La velocità massima che è la velocità di progetto viene scelta in base alle condizioni planoaltimetriche del tracciato di massima.

Essa si distingue dalla velocità di esercizio o di fiancata che invece è la massima velocità alla quale effettivamente alcuni treni percorrono un determinato tratto di linea. La differenza è dovuta per esempio al fatto che sulla linea possono essere impiegati mezzi di trazione che non permettono il raggiungimento della velocità di progetto, alle condizioni dell'armamento che possono essere tali da imporre l'esercizio ad una velocità inferiore a quella consentita dal tracciato.

La stessa espressione del calcolo del raggio minimo è stata poi utilizzata per calcolare le sopraelevazioni corrispondenti alle curve di raggio superiore a quello minimo considerando la stessa velocità di progetto.

Data una curva di raggio R maggiore del raggio minimo ammesso dalla linea si ricava un intervallo di valori possibili di h nel seguente modo:

$$\frac{V^2}{R(h) \cdot 1.33} - 0.5 < h(R, V) < \frac{V^2}{R(h) \cdot 1.33} + 0.5$$

relazione che si ricava dalla seguente esplicitando h:

$$\frac{V^2}{3.6^2 \cdot \left( \frac{h_{\max}}{150} \cdot g + 0.6 \right) \cdot \frac{h + 0.5}{h_{\max}}} < R(h) < \frac{V^2}{3.6^2 \cdot \left( \frac{h_{\max}}{150} \cdot g + 0.6 \right) \cdot \frac{h - 0.5}{h_{\max}}}$$

Noto il campo di valori per h si sceglie un valore discreto in esso compreso.

I valori di h per il nostro studio sono stati calcolati in questo modo.

Tra un rettilineo ed una curva circolare è stata inserita una curva di transizione costituita da un arco di parabola cubica posta simmetricamente a cavallo del punto di tangenza tra rettilineo e curva.

Questo è necessario sia per graduare la variazione dell'accelerazione non compensata con andamento praticamente lineare sia per raccordare la differenza di quota della rotaia sopraelevata con una rampa a pendenza costante.

L'inserimento è stato fatto conservando il centro della curva circolare primitiva e scostando questa verso l'interno.

La lunghezza del raccordo parabolico viene determinata per velocità inferiori a 160 km/h fissando il valore della pendenza delle rampe di raccordo della sopraelevazione (p) che viene assunto pari a:

0.20% per velocità fino a 75 km/h

0.15% per velocità fino a 100 km/h

0.10 % per velocità superiori a 100 km/h

in pratica si ricava L dalla seguente formula:

$$L = \frac{h}{p}$$

L'equazione del raccordo si è ottenuta imponendo che la curvatura variasse linearmente dal valore nullo corrispondente al tratto in rettilineo al valore 1/R della curva circolare ed è la seguente:

$$y = \frac{x^3}{6 \cdot R \cdot L}$$

Tuttavia affinché il raccordo venga correttamente inserito tra il rettilineo e la curva circolare è anche necessario che il punto finale del raccordo abbia anche la stessa ordinata e la stessa tangente della curva circolare oltre ad avere la stessa curvatura.

Per ottenere questo è stata anticipata l'origine del raccordo di L/2 rispetto al punto di tangenza tra rettilineo e curva circolare ed è stato traslato il cerchio verso il centro di una quantità pari ad "m". In genere si mantiene il centro della curva primitiva e si diminuisce il valore del raggio (inserimento a centro conservato)

$$m = \frac{L^2}{24 \cdot R}$$

dove: L è la lunghezza del raccordo parabolico

R è il raggio della curva definitivo

Per quanto riguarda i raccordi almetrici tra le livellette, essi sono stati realizzati mediante curve circolari di raggio pari a:

$$R = \frac{V^2}{2}$$

con: R in metri

V in km/h

(Solo in casi eccezionali sarebbero ammessi valori inferiori e comunque con un minimo di 3000 metri per le basse velocità).

Tale espressione è ottenuta imponendo l'equilibrio tra peso statico gravante sulla rotaia, cioè l'aderenza e la forza centrifuga che nel caso del dosso tenderà ad allontanare le ruote dalle rotaie mentre nelle sacche incrementerà il carico statico.

Tuttavia il tracciamento del raccordo verticale con arco di circonferenza risulta poco pratico dato che, difficilmente la verticale per il punto d'incontro delle due livellette da raccordare è la bisettrice dell'angolo che esse formano (questo avviene solo nel caso di dosso o sacca raccordante livellette di ugual valore assoluto).

La lunghezza del raccordo è pari a:

$$l_v = 2 \cdot t_v = 2 \cdot R_v \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

dove  $t_v$  è la distanza del punto di tangenza dal vertice.

Si può approssimare  $l_v$  con il valore dato dalla seguente espressione:

$$l_v = R_v \cdot \frac{\Delta i}{100}$$

dove:

$$\Delta i = |i_1 - i_2|$$

Anche se la lunghezza del raccordo è stata calcolata come arco di curva circolare, il tracciamento è da effettuarsi come arco di curva parabolica di pari lunghezza.

Data l'equazione generale della circonferenza:

$$y = ax^2 + bx + c$$

riferita ad un sistema di assi cartesiani ortogonali con origine nel punto O (origine del raccordo) e con asse delle ascisse orizzontale i valori dei coefficienti si sono ricavati imponendo le seguenti condizioni:

$$\text{per } x = 0 \quad y = 0$$

$$\text{per } x = 0 \quad \frac{d}{dx}y = \frac{i_1}{100}$$

$$\text{per } x = l_v \quad \frac{d}{dx}y = \frac{i_2}{100}$$

quindi

$$a = \frac{i_2 - i_1}{200 \cdot l_v} \quad b = \frac{i_1}{100} \quad c = 0$$

L'equazione da usare per tracciare il raccordo verticale è la seguente:

$$y = \frac{i_1}{100} \cdot x - \frac{\Delta i}{200 \cdot l_v} \cdot x^2$$

Comunque la parabola si può costruire più semplicemente sottraendo nel caso di raccordi convessi o sommando nel caso di raccordi concavi alle quote di progetto le quantità:

$$\Delta y_i = \frac{\Delta i}{200 \cdot l_v} \cdot x_i^2$$

nel tratto dall'origine fino all'ascissa del vertice

$$x_v = \frac{l_v}{2}$$

Nella seconda metà le quantità da sommare risultano simmetriche.

## CALCOLO RAGGIO DI CURVA E RACCORDO PARABOLICO

### Curva 1:

$V_p = 140$ km/h	Velocità di progetto
$R_{min} = 918.58$ m	Raggio minimo
$R = 923$ m	Raggio della curva
$\alpha = 21.96^\circ$	Angolo al centro
$L_t = 179.08$ m	Lunghezza della tangente
$h = 15.97$ cm	Sopraelevazione della rotaia esterna
$L = 159.70$ m	Lunghezza del raccordo parabolico
$A = 79.85$ m	Anticipo del raccordo parabolico
$m = 0.93$ m	Riduzione del raggio della curva circolare
$R' = 921.85$ m	Valore del nuovo raggio tangente al raccordo parabolico

$La = 193 \text{ m}$	Lunghezza dell'arco con il nuovo valore del raggio e l'introduzione del raccordo
<u>Curva 2:</u>	
$V_p = 130 \text{ km/h}$	Velocità di progetto
$R_{min} = 792.04 \text{ m}$	Raggio minimo
$R = 798 \text{ m}$	Raggio della curva
$\alpha = 40.45^\circ$	Angolo al centro
$L_t = 385.07 \text{ m}$	Lunghezza della tangente
$h = 15.9 \text{ cm}$	Sopraelevazione della rotaia esterna
$L = 159 \text{ m}$	Lunghezza del raccordo parabolico
$A = 79.5 \text{ m}$	Anticipo del raccordo parabolico
$m = 1.32 \text{ m}$	Riduzione del raggio della curva circolare
$R' = 796.68 \text{ m}$	Valore del nuovo raggio tangente al raccordo parabolico
$La = 228.66 \text{ m}$	Lunghezza dell'arco con il nuovo valore del raggio e l'introduzione del raccordo

#### CALCOLO RACCORDI ALTIMETRICI

##### Raccordo verticale 1:

$i_1 = -0.51\%$	Pendenza longitudinale della prima livelletta
$i_2 = -1.5\%$	Pendenza longitudinale della seconda livelletta
$\Delta i = 0.99$	Differenza di pendenza in valore assoluto
$V = 140 \text{ km/h}$	Velocità massima di percorrenza del raccordo
$R_v = 9800 \text{ m}$	Raggio del raccordo verticale
$l_v = 97.02 \text{ m}$	Sviluppo del raccordo verticale

##### Raccordo verticale 2:

$i_1 = -1.5\%$	Pendenza longitudinale della prima livelletta
$i_2 = 0\%$	Pendenza longitudinale della seconda livelletta

$\Delta i = 1.5$	Differenza di pendenza in valore assoluto
$V = 140 \text{ km/h}$	Velocità massima di percorrenza del raccordo
$R_v = 9800 \text{ m}$	Raggio del raccordo verticale
$l_v = 147 \text{ m}$	Sviluppo del raccordo verticale

##### Raccordo verticale 3:

$i_1 = 0\%$	Pendenza longitudinale della prima livelletta
$i_2 = +1.5\%$	Pendenza longitudinale della seconda livelletta
$\Delta i = 1.5$	Differenza di pendenza in valore assoluto
$V = 130 \text{ km/h}$	Velocità massima di percorrenza del raccordo
$R_v = 8450 \text{ m}$	Raggio del raccordo verticale
$l_v = 147 \text{ m}$	Sviluppo del raccordo verticale

##### Raccordo verticale 4:

$i_1 = +1.5\%$	Pendenza longitudinale della prima livelletta
$i_2 = +0.077\%$	Pendenza longitudinale della seconda livelletta
$\Delta i = 1.5$	Differenza di pendenza in valore assoluto
$V = 130 \text{ km/h}$	Velocità massima di percorrenza del raccordo
$R_v = 8450 \text{ m}$	Raggio del raccordo verticale
$l_v = 120.24 \text{ m}$	Sviluppo del raccordo verticale



## **B. REALIZZAZIONE DEL SITO WEB**

E' in fase di realizzazione il sito web della collaborazione scientifica fra Dipartimento di Ingegneria Civile – Università di Pisa ed il Comune di Altopascio (Lu).

Sul sito, oltre ad essere pubblicate le principali informazioni relative alla collaborazione scientifica, quali l'oggetto della collaborazione, l'importo, la durata, il nome del responsabile tecnico scientifico e dei vari collaboratori, verranno pubblicati i risultati intermedi delle diverse attività svolte, previa autorizzazione dell'Amministrazione. Pertanto potranno essere scaricati dal sito web le relazioni, i documenti riguardanti gli studi e le attività intraprese ed anche gli elaborati grafici.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Silvia Foini - Giulio Materini , “Cantieri stradali e ambiente”, “Le Strade”, n° 10 ott. 2004  
Federico Gervaso, “Svizzera Sorreranea”, “Le Strade”, n° 10 ott. 2004  
Lorenzo Quarzo, “Finalmente passa il passante milanese”, “Le Strade”, n°5 mag. 2004;  
Lorenzo Quarzo, “Londra è arrivata in continente”, “Le Strade”, n°3 mar. 2004;  
Federico Gervaso, “il rettilineo di arrivo”, “Le Strade”, n°12 dic. 2004;  
Brunello Confortini, “L’Europa nasce sui binari”, “Quarry and Construction”, n°4 apr. 2004;  
“Variante di Martignano”, “Quarry and Construction”, n°3 mar. 2004;  
Davide Rizzo, “In fondo al Tunnel”, “Quarry and Construction”, n°1 gen. 2003;  
“La geotecnica a servizio di strade e gallerie”, “Cantieri strade e costruzioni”, n°184 mag. 2004;  
“La linea ad alta velocità To-Mi”, “Cantieri strade e costruzioni”, n°180 dic. 2003;  
“Tubi di ventilazione per gallerie e miniere”, “Cantieri strade e costruzioni”, n°165 apr. 2002;  
Adolfo Colombo, “Il sistema M3 standard tecnici e nuove soluzioni”, monografia fuori commercio MM Linea 3, mag. 1995;  
Emilio Pagnoni – Francesco Venza, “ Due metodi costruttivi diversi a confronto per sottopassare due importanti infrastrutture”, monografia fuori commercio MM Linea 3, mag. 1995;  
G. Tesoriere, “Strade Ferrovie e Aeroporti”, ristampa 1996;  
Tages s.c.r.l., “Indagine sui flussi veicolari nei comuni di Altopascio e Porcari”, allegato A, Provincia di Lucca Servizio Urbanistica, mag. – giu. 2004;  
Italfer, “Nodo urbano di Torino, potenziamento della linea Bussoleno – Torino e cintura merci”, nov.2003;  
“Conoscere Milano, il Passante Ferroviario”, pubblicazione giu. 2004  
Lucio Mayer, “Impianti Ferroviari” I° Volume, nuova edizione a cura di Pierluigi Giuda ed Eugenio Milizia anno 2003;

Sono stati inoltre consultati i seguenti siti:

[www.questotrentino.it/2001/12/Coverstory12\\_01.html](http://www.questotrentino.it/2001/12/Coverstory12_01.html)

[www.geodata.it/progetti/trasfurbana/toceres/](http://www.geodata.it/progetti/trasfurbana/toceres/)

[www.satti.it/sain0199.html](http://www.satti.it/sain0199.html)