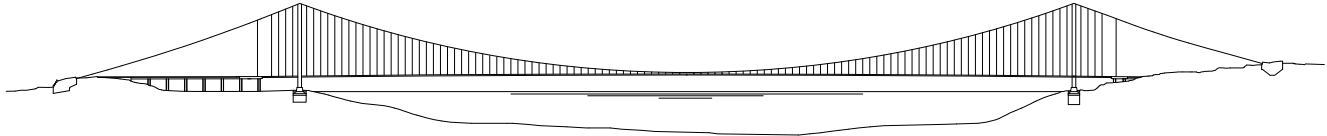


PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



PROGETTO DEFINITIVO

EUROLINK S.C.p.A.

IMPREGILO S.p.A. (Mandataria)

SOCIETA' ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.p.A. (Mandante)

COOPERATIVA MURATORI E CEMENTISTI - C.M.C. di Ravenna Soc. Coop. a.r.l. (Mandante)

SACYR S.A.U. (Mandante)

ISHIKAWAJIMA - HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO. Ltd. (Mandante)

A.C.I. S.C.P.A. - CONSORZIO STABILE (Mandante)

IL PROGETTISTA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI TORVERGATA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA

Prof. M. Marinelli

Dott. Ing. E. Pagani

Ordine Ingegneri Milano

n° 15408



IL CONTRAENTE GENERALE
PROJECT MANAGER
(Ing. P.P. Marcheselli)

STRETTO DI MESSINA
Direttore Generale
e RUP Validazione
(Ing. G. Fiamminghi)

STRETTO DI MESSINA
Amministratore Delegato
(Dott. P. Ciucci)

COLLEGAMENTI SICILIA

STAZIONI – OPERE CIVILI

ELEMENTI DI CARATTERE GENERALE

STUDIO SULL'ENTITA' DELLE CORRENTI GENERATE NELLE STAZIONI

EUROPA, PAPARDO E ANNUNZIATA DAI TRENI IN TRANSITO

NEI TUNNEL

ST0001_F0

CODICE

C G 3 8 0 0 P s 0 S C S 0 0 G 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 F0

SCALA:

-

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
FO	20-06-2011	EMISSIONE FINALE	V.MULONE	R. VERZICCO	R. VERZICCO



UNIVERSITA' degli STUDI di ROMA
TOR VERGATA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA

Studio sull'entità delle correnti generate nelle stazioni Europa, Papardo e
Annunziata dai treni in transito nei tunnel

Prof. Roberto Verzicco

Redatto: R. Verzicco 4/11/2010

Verificato: R. Verzicco 4/11/2010

Approvato: R. Verzicco 4/11/2010

Autorizzato: R. Verzicco 4/11/2010

1 Novembre 2010

Indice

Scopo e motivazione	3
PARTE PRIMA: FENOMENI LEGATI ALLA COMPRIMIBILITA'...	7
Teoria fisica del fenomeno e modelli di calcolo.....	7
Resistenza all'avanzamento di un treno.....	7
Equazioni e metodo numerico.....	9
RISULTATI.....	11
Descrizione di un caso tipico e fenomenologia di base: Tunnel S. Agata, Treno ETR500...	11
Tunnel S. Agata, Treno merci.....	19
Tunnel S. Cecilia, Treno ETR500.....	22
Tunnel S. Cecilia, Treno merci.....	26
PARTE SECONDA: FENOMENI TRIDIMENSIONALI.....	29
Equazioni e modello numerico.....	29
Risultati.....	32
Conclusioni.....	37
Bibliografia	38

Scopo e motivazione

Il presente studio è volto al calcolo della corrente generata da un treno, a seguito del suo passaggio in un tunnel ferroviario, in funzione delle caratteristiche geometriche e dinamiche del treno e dei dettagli costruttivi della galleria. Lo scopo è di stimare l'entità delle correnti generate dal passaggio del treno nei vari punti dei tunnel con particolare riguardo alle posizioni delle stazioni sotterranee Papardo, Annunziata ed Europa nei tunnel S. Cecilia e S. Agata del tratto di collegamento al ponte di attraversamento dello Stretto di Messina nel versante siciliano. Seguendo le indicazioni fornite durante lo svolgimento dello studio le stime sono state eseguite in assenza di ventilazione forzata o forzanti (venti) atmosferiche. Nella geometria delle gallerie sono stati considerati chiusi tutti i tunnel di interconnessione tra i fornici dei due sensi di marcia ad eccezione dei passaggi in corrispondenza delle stazioni. Sono stati anche considerati, ove presenti, i pozzi di ventilazione. Lo studio è suddiviso essenzialmente in due parti: in una prima sono state considerate le correnti prodotte dal treno a causa dei fenomeni di comprimibilità, ossia per le onde di compressione ed espansione (primarie e riflesse) che si propagano ed interagiscono all'interno del tunnel, questi fenomeni causano venti nelle stazioni anche quando il treno non transita nelle stesse. In una seconda fase sono state invece stimate le correnti prodotte dai treni nel loro passaggio attraverso la stazione e ciò richiede uno studio completamente tridimensionale del fenomeno.

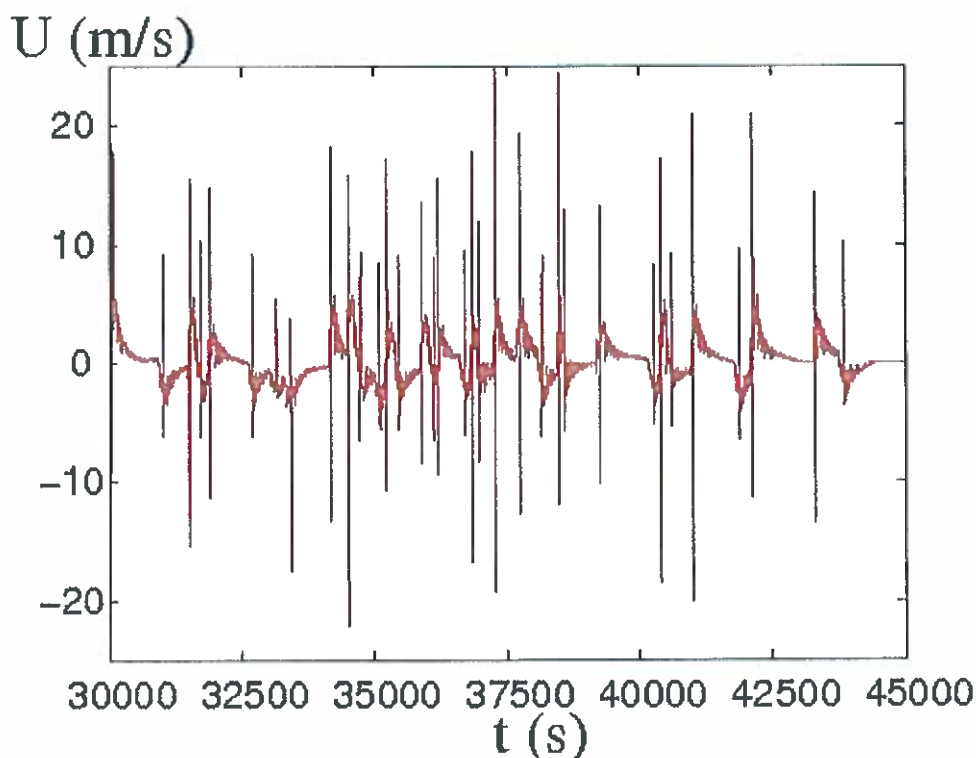


Figura 1: Acquisizione del segnale di velocità longitudinale in un tunnel del tratto Firenze-Bologna per circa 4.2 ore. I treni (ETR500) transitano ad una velocità di circa 300 Km/h e la sezione del tunnel è circa $90m^2$.

Al fine di mostrare la validità degli strumenti utilizzati e di illustrare la complessità del problema si

descriverà brevemente un caso già studiato per il passaggio di treni ad alta velocità (ETR500) in uno dei tunnel del tratto lungo la linea Firenze-Bologna.

All'interno di un tunnel, a circa metà della sua lunghezza ed a una distanza di 60cm dalla parete laterale è stata posta una centralina che, tra le altre cose, poteva misurare l'intensità della velocità longitudinale e la sua direzione; in figura 1 è riportata un'acquisizione di circa 4.2 ore durante le quali si sono registrati sia passaggi nella direzione Firenze-Bologna che in quella opposta. Nella figura 2 è stato isolato un singolo evento della durata di circa 15 minuti che evidenzia un singolo passaggio nella direzione Firenze-Bologna. Si può notare come ci sia una crescita lenta ma continua della velocità del tunnel seguita da una diminuzione ancora più lenta.

Questo andamento, continuo e regolare, è interrotto solo da un evento di natura impulsiva, caratterizzato da valori di velocità notevolmente più elevati rispetto al resto della dinamica; ciò rappresenta il transito del treno davanti al sensore di velocità e, sebbene sembri di natura impulsiva e discontinua, una sua attenta analisi (figura 3) rivela che la sua durata è di circa 15 secondi.

Come accennato in precedenza, la parte di fenomenologia regolare e di lunga durata è legata ai fenomeni di propagazione delle onde di pressione e può essere studiata con modelli quasi-monodimensionali che consentono con modesti sforzi computazionali di analizzare fenomeni anche di lunga durata.

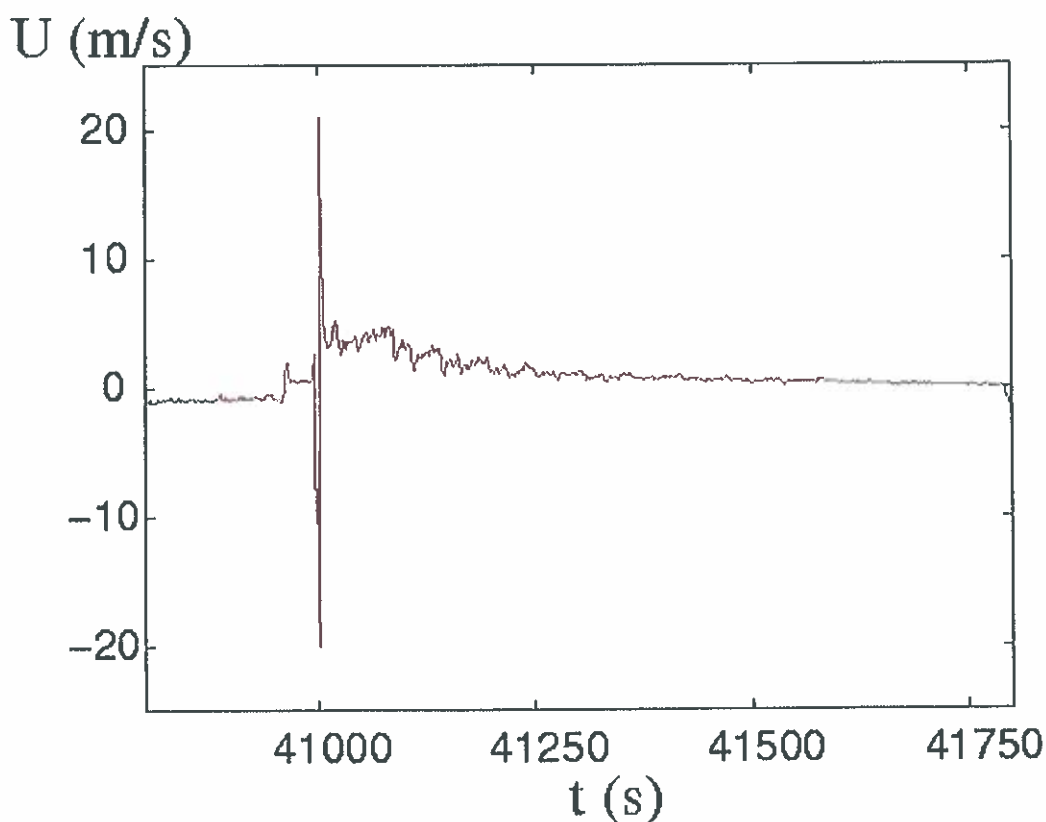


Figura 2: Segnale di velocità longitudinale (come in figura 1) ma per un lasso temporale di circa 15 minuti che evidenzia un singolo passaggio nella direzione Firenze-Bologna.

In figura 4 si riporta un confronto tra i risultati ottenuti con il modello numerico quasi-monodimensionale e le misure rilevate direttamente nel tunnel. Appare evidente che il modello coglie adeguatamente sia i valori delle velocità che la loro fluttuazione ed il loro decadimento nel tempo. Tale modello tuttavia, calcolando solo le quantità mediate sulle sezioni del tunnel non può riprodurre la fenomenologia del passaggio del treno davanti al sensore che, essendo un fenomeno intrinsecamente tridimensionale, ha bisogno di un modello più complesso.

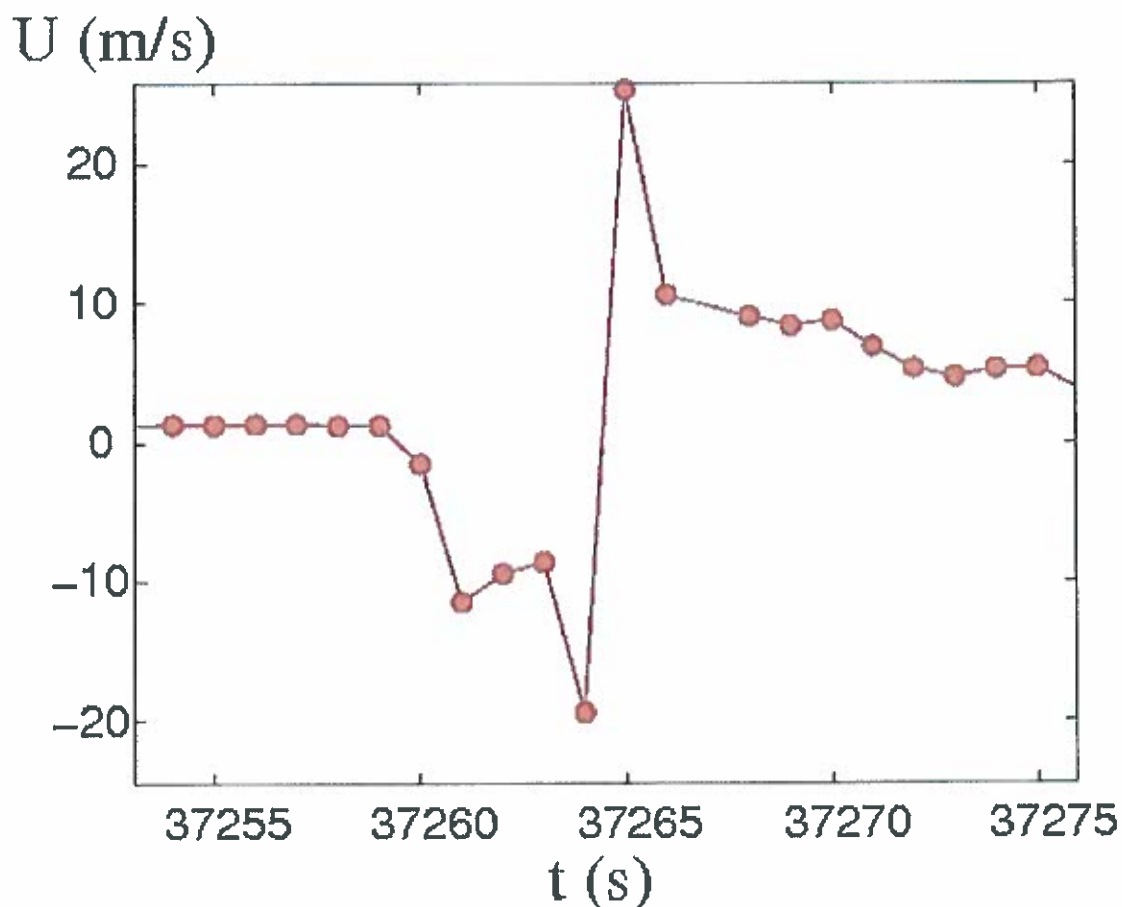


Figura 3: Zoom del segnale di velocità longitudinale (come in figura 2) per evidenziare il passaggio del treno davanti al sensore. I simboli sulla linea mostrano la frequenza di campionamento del segnale (1Hz).

Questo confronto è riportato in figura 5 dove si nota che le velocità indotte dalla fenomenologia tridimensionale, sebbene di durata più breve siano notevolmente più intense rispetto ai fenomeni legati alla comprimibilità. Anche in questo caso il modello numerico, sebbene notevolmente più complesso è in grado di cogliere gli effetti principali del transito sia per quanto riguarda i valori di picco della velocità che la loro variazione temporale.

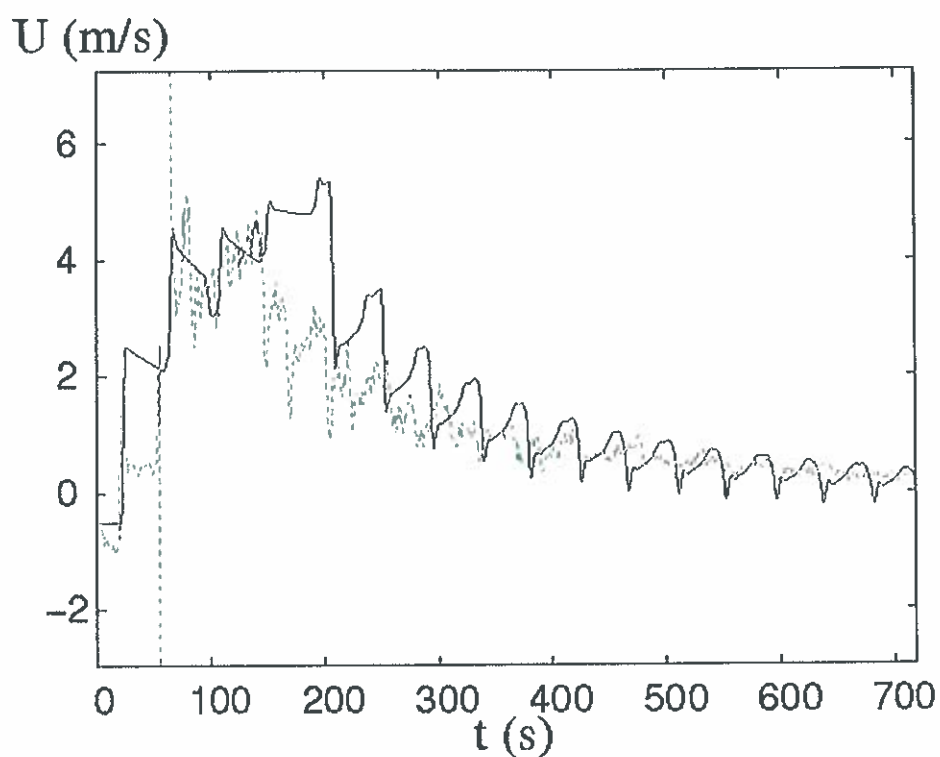


Figura 4: Confronto tra misura "in situ" (linea verde) della velocità longitudinale nel tunnel e risultati del modello numerico quasi-monodimensionale (linea rossa).

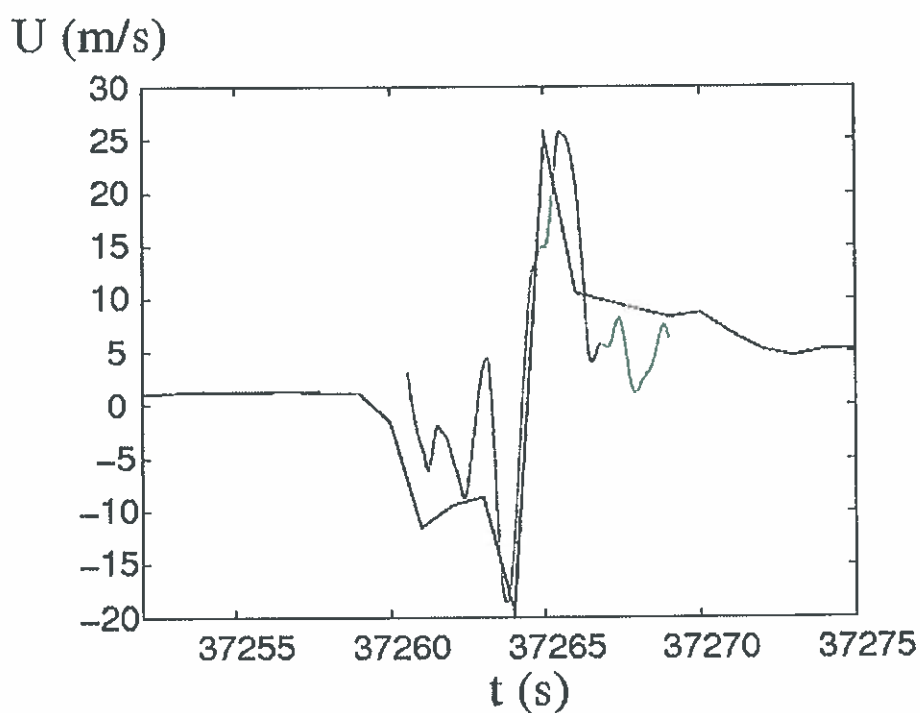


Figura 5: Confronto tra misura "in situ" (linea rossa) della velocità longitudinale nel tunnel e risultati del modello numerico tridimensionale (linea verde).

PARTE PRIMA: FENOMENI LEGATI ALLA COMPRIMIBILITA'

Teoria fisica del fenomeno e modelli di calcolo

Un treno, durante il suo moto, è soggetto ad una resistenza all'avanzamento prodotta sia dall'attrito dell'aria che lambisce la sua superficie esterna sia dallo sbilanciamento della pressione tra la testa e la coda del treno. Tale resistenza ha come effetto il trascinamento dell'aria intorno al treno che genera una corrente nella stessa direzione del treno. Quando ciò avviene all'interno di un tunnel il fenomeno si complica per due motivi: l'attrito tra l'aria e le pareti della galleria tendono a rallentare il flusso d'aria (e quindi ad aumentare la resistenza che avverte il treno) e le perturbazioni di pressione si propagano lungo il tunnel come onde che viaggiano avanti ed indietro alla velocità del suono ed interagendo tra loro non solo modificano le caratteristiche del flusso d'aria ma generano elevate sovrappressioni e depressioni che risultano pericolose per l'integrità delle strutture e per il comfort di eventuali persone presenti lungo il tunnel (viaggiatori in attesa sulla banchina lungo una stazione sotterranea o personale di servizio). Il fenomeno riguarda anche i passeggeri del treno sebbene in questo caso la pressurizzazione interna riduce i potenziali danni. Nel seguito di questa relazione verranno illustrate le basi teoriche dei modelli utilizzati e le procedure di calcolo adottate. Saranno infine discussi i risultati ottenuti.

Resistenza all'avanzamento di un treno

Secondo i lavori di Shetz (2001) e Raghunthan, Kim & Setoguchi (2002) la resistenza all'avanzamento di un treno si può esprimere come:

$$R = A + B_1 V_G + B_2 V_A + CT V_A^2$$

dove, V_G è la velocità del treno rispetto al suolo, V_A la velocità rispetto all'aria, A , B_1 , B_2 e C dei coefficienti che dipendono dal particolare tipo di treno e T un coefficiente che vale 1 se il treno è fuori da un tunnel mentre è >1 per un treno all'interno di una galleria. Per una dettagliata disamina sulla determinazione di T si può vedere Melis *et al.* (2001). Il termine A è un attrito di tipo statico (tipicamente di rotolamento) che non dipende dalla velocità mentre B_1 tiene in conto attriti di tipo meccanico come perdite nella trasmissione ed attriti nei freni. B_2 è la resistenza prodotta dall'aria utilizzata dal treno per raffreddamento dei vari componenti, condizionamento e combustione (in caso di locomotori con motori a combustione interna). Il coefficiente C , infine, dà la resistenza aerodinamica all'avanzamento ed è la parte preponderante essendo pesata con il quadrato della velocità.

E' importante notare che i primi due termini nell'espressione di R sono termini di tipo meccanico che trasformano l'energia del treno direttamente in calore; gli ultimi due termini, al contrario, sono di tipo fluidodinamico e convertono l'energia del treno in quantità di moto dell'aria intorno al

convoglio che solo in ultima analisi diventa calore a causa della dissipazione viscosa.

In questo studio, siamo interessati alla corrente generata all'interno di una galleria a seguito del passaggio di un treno, e sono quindi solo gli ultimi due termini di R che agiranno direttamente sulla formazione di tale corrente; notiamo a margine, comunque, che i primi due termini dell'espressione di R per le normali velocità di marcia di un treno, contribuiscono solo in minima parte (<10%) al valore totale della forza. Si definisce con $R_A = B_2 V_A + CT V_A^2$ la resistenza fluidodinamica del treno che può anche essere interpretata come la forza che il convoglio esercita sull'aria circostante; se quindi il treno è in galleria ed S è la sezione del tunnel allora il passaggio del treno genera una differenza di pressione pari a $\Delta p = R_A / S$. Questa osservazione risulta particolarmente utile in quanto, essendo in questo caso la lunghezza del tunnel considerevolmente maggiore rispetto a quella del treno è possibile analizzare il passaggio del treno in galleria come un tubo all'interno del quale c'è una "pompa" che si muove con la velocità del treno. Questa approssimazione è possibile a patto che la pressione a monte ed a valle del treno risulti effettivamente uniforme per ogni sezione del tunnel e mentre ciò risulta sicuro nel caso di una pompa disposta lungo un tubo la stessa ipotesi è meno scontata per un treno in un tunnel, specialmente in considerazione del fatto che il bloccaggio, cioè il rapporto tra la superficie frontale del treno e la sezione del tunnel, è molto limitato (in questo caso particolare compreso fra 0.235 e 0.131. Questa congettura è stata verificata direttamente mediante una simulazione tridimensionale di un treno all'interno di un tratto di tunnel ed i risultati sono mostrati nella seconda parte di questo studio.

Riguardo ai coefficienti B_2 , C e T questi dipendono dal particolare treno e comunque, anche per uno stesso treno, non esiste unanimità di valori in letteratura. E' stato comunque verificato che, prendendo i valori estremi pubblicati, si ha una variazione massima di R_A del 10% che risulta ampiamente entro le incertezze sui dati iniziali, sulle misure e la loro elaborazione statistica.

Il calcolo del coefficiente C è quello che risulta più laborioso in quanto dipende da molti altri parametri costruttivi del treno; in particolare, detto C_{DL} il coefficiente di resistenza della locomotiva di testa, C_B lo stesso parametro per il vagone di coda λ_T il coefficiente d'attrito del treno, L la sua lunghezza ed l la lunghezza della locomotiva di testa ed infine A la sezione frontale del treno si può compilare la seguente tabella:

treno	C_{DL}	C_B	λ_T	L (m)	l (m)	A (m ²)	C_D	C
FTR500	0.24	0.11	0.0192	354	20.25	9.3	2.45	13.96
ETR480	0.24	0.11	0.0192	236	20.25	9.3	1.71	9.73
Espresso	0.3	0.11	0.0248	330	20.00	9.5	2.93	16.69
Merci	0.5	0.11	0.0624	650	20.00	9.5	13.5	76.90

Dove il coefficiente di resistenza C_D è stato calcolato dalla formula $C_D = C_{DL} + C_B + \lambda_T (L-l)/A^{1/2}$ (Shetz, 2001) mentre C si ricava dalla relazione $CT V_A^2 = \rho V_A^2 A C_D / 2$ con ρ la densità dell'aria. I dati riportati in tabella sono stati reperiti ove possibile da Trenitalia altrimenti dai siti web dei costruttori o dalla letteratura nazionale ed internazionale. Alcuni dati sono stati invece stimati avendo comunque cura di verificare che fossero tutti compatibili con le normative vigenti ed in caso di ambiguità è stato scelto il valore più conservativo ai fini del presente studio. Λ

titolo di esempio si consideri la lunghezza del convoglio; mentre per i treni ad alta velocità (tipo ETR500) si tratta di un dato certo in quanto si ha una configurazione bloccata lo stesso non si può dire per i treni merci la cui composizione dipende dal numero di carri, dalla loro tipologia la configurazione di carico etc.. Per la presente analisi si è quindi assunto che il convoglio abbia la massima lunghezza possibile (secondo le attuali normative) in quanto ciò produrrà la corrente più intensa nel transito in una stazione e quindi la condizione più sfavorevole per gli scopi di questo studio.

Secondo il lavoro di Melis *et al.* (2001) il coefficiente di tunnel T , dipende molto dal bloccaggio A/S e dalla lunghezza del treno e meno dalla lunghezza della galleria, tuttavia per la gamma di applicazioni rilevanti per questo studio si può assumere un valore $T=1.35$ con un margine di errore del 10%.

Infine per il coefficiente B_2 vengono forniti in letteratura dei valori per unità di lunghezza del treno con

$B_2/L=0.2-0.25$ Kg/s con i valori maggiori per i treni con motore a combustione interna ed i valori minori per i treni a trazione elettrica privi di condizionatore. In questo studio, data la presenza esclusiva di treni elettrici e la netta prevalenza di treni passeggeri (con condizionamento) è stato assunto in tutti i casi il valore $B_2/L=0.225$ Kg/s; è bene comunque notare che il coefficiente B_2 determina solo una parte (minore) di R_4 e quindi anche assumendo lo scostamento massimo tra valore assunto e valore reale per tale coefficiente (12.5%) l'impatto sul valore di R_4 risulterebbe comunque all'interno dell'incertezza globale.

Equazioni e metodo numerico

Dalla conservazione della massa e dell'energia e dal bilancio di quantità di moto, supponendo il tunnel quasi monodimensionale (per contemplare anche eventuali variazioni di sezione) le equazioni di governo si scrivono come:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\rho}{S} \frac{\partial (uS)}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\tau}{D} - \Pi g(U, X) \\ \frac{\partial q}{\partial t} + u \left(\frac{\partial q}{\partial x} + r \frac{\partial T}{\partial t} \right) + r \frac{T}{\rho S} \frac{\partial \rho u S}{\partial x} &= \frac{4\phi_r}{\rho D} - \frac{\pi i}{D} \end{aligned}$$

dove ρ è la densità dell'aria, u la velocità assiale nel tunnel, p la pressione e T la temperatura; tutte le quantità sono da intendere come valori medi assunti nella generica sezione di area S (supposta circolare), diametro D e di ascissa x del condotto; $q=c_p T + u^2/2$ è l'energia specifica; c_p è il calore specifico a volume costante; $\tau = -\text{sgn}(u) \cdot \left(f + K \cdot \frac{D}{dx} \right) \cdot \frac{u^2}{2}$ è una grandezza che tiene conto degli effetti dissipativi (in essa f è il fattore d'attrito ottenuto dal diagramma di Moody una volta nota la rugosità relativa ε/D del condotto), K è il coefficiente di perdita di carico concentrata, che si può determinare mediante apposite tabelle reperibili in letteratura, mentre $\text{sgn}(\cdot)$ rappresenta, la funzione segno); ϕ_r è il flusso termico scambiato; r è la costante dell'aria nell'equazione di

stato dei gas perfetti, $\Pi = \Delta p / L$ è il gradiente di pressione prodotto dal passaggio del treno la cui distribuzione spaziale dipende dalla posizione X e dalla velocità del treno U attraverso la funzione $g(U, X)$.

L'integrazione di queste equazioni è possibile assegnando le condizioni al contorno all'ingresso ed all'uscita del tunnel in termini di velocità o suo gradiente e pressione totale. Tutte le derivate parziali sono state approssimate con delle differenze finite e l'integrazione nel tempo è stata eseguita con un metodo esplicito Adams-Bashfort. Con queste posizioni il sistema di equazioni differenziali sopra descritto è stato trasformato in un sistema di equazioni algebriche facilmente risolvibile al calcolatore. Indipendentemente dalla lunghezza del tunnel la discretizzazione spaziale prevede una spaziatura costante e pari a dieci metri mentre la discretizzazione temporale è stata effettuata con passo variabile per permettere allo schema numerico di risolvere con maggior dettaglio gli eventi più rapidi e di poter accelerare nelle fasi di dinamica più lenta; il passo temporale medio è comunque dell'ordine di un millisecondo e mai maggiore di 5 millisecondi. Maggiori dettagli sul metodo numerico ed estensive campagne di validazione mediante il confronto con prove sperimentali sono riportati in Cantone *et al.* (2007). Da simulazioni preliminari e prove di validazione è stato visto che uno dei parametri che maggiormente influenzano la soluzione è il fattore d'attrito f che si calcola dal diagramma di Moody o, in modo equivalente, dalla formula iterativa di Colenbrook. Bisogna però notare che questo tipo di parametrizzazione è strettamente valido solo per un condotto a sezione circolare cosa chiaramente non vera per una galleria ferroviaria. In questi casi si ricavano delle grandezze "idrauliche" che permettono di calcolare dalla sezione reale delle quantità equivalenti per un condotto a sezione circolare; più nello specifico se P è il perimetro bagnato della sezione del tunnel e S la sua sezione si definisce il diametro idraulico come $D = 4S/P$, che per una sezione circolare restituisce esattamente il suo diametro. Per il calcolo del fattore d'attrito bisogna conoscere il numero di Reynolds locale del flusso $Re = \rho U D / \mu$, con μ la viscosità dinamica del fluido, e la rugosità relativa ε/D del condotto. Per le applicazioni di questo studio, comunque, i numeri di Reynolds sono sempre sufficientemente elevati da rendere f indipendente da Re per cui l'unico parametro rilevante rimane la rugosità relativa. ε definisce un valore medio di rugosità superficiale che è caratteristico della finitura della superficie stessa. Per un tunnel ferroviario la determinazione di ε non è immediata in quanto la rugosità non è omogenea su tutta la superficie: in particolare in basso c'è la sede ferroviaria prevalentemente ricoperta dal ballast la cui granulometria media è dell'ordine dei 50 mm. La finitura delle pareti laterali e della volta è invece molto più fine presentando asperità dell'ordine del millimetro; bisogna però considerare che la sezione tipo del tunnel non è completamente sgombra ma è occupata dalle mensole e dalla catenaria della linea elettrificata, ci sono nicchie di ricovero lungo tutta la galleria e sono presenti varie segnaletiche. In letteratura (Raghunthan, Kim & Setoguchi, 2002) sono presenti valori sperimentali pari a $f = 0.02$ ottenuti per i treni ad alta velocità (Shinkansen) in lunghe gallerie fino a valori di $f = 0.06$ utilizzati da Flaminia, Milicotti & Scarano (2006) per i tunnel delle ferrovie italiane. Si vuole notare che nello studio Flaminia, Milicotti & Scarano, (2006) il tunnel considerato era più corto di quelli presentemente analizzati e, utilizzando un codice proprietario, il fattore d'attrito della galleria era proprio un parametro di tuning per ottenere l'accordo tra dati numerici e misurazioni sperimentali. In questo contesto si è capitalizzata l'esperienza maturata in un precedente studio in cui sono state velutate le correnti prodotte dai treni ad alta velocità nei lunghi tunnel del tratto Firenze-Bologna. In quello studio è stato appurato che i valori $f = 0.02$ tendono a sovrastimare l'intensità delle correnti mentre un

valore pari a $f=0.06$ dà risultati più vicini alle rilevazioni sperimentali. Vale la pena di osservare comunque che f è fortemente dipendente da tutti gli elementi presenti nel tunnel e che alti valori del fattore d'attrito vanno a sfavore della sicurezza, tendono cioè a predire correnti meno intense. Per tale motivo in questo studio verranno effettuate anche delle simulazioni con valori minori di f per verificare la sensibilità della soluzione a tale parametro e poterne descrivere gli effetti oltre che dare un intervallo di incertezza con cui utilizzare i risultati.

RISULTATI

Descrizione di un caso tipico e fenomenologia di base: Tunnel S. Agata, Treno ETR500

Per comprendere meglio la dinamica del passaggio del treno in un tunnel, si descriveranno nel seguito in modo dettagliato i fenomeni che avvengono per un caso rappresentativo tralasciando poi molti dei particolari negli altri casi. La galleria S. Agata è lunga circa 4390m (dal Km 0+963 al Km 5+355 del tracciato) di sezione costante pari a $S=51m^2$ per ogni singolo fornice (figura 6), ad eccezione del tratto in corrispondenza della stazione Papardo (al Km 3+400 del tracciato) dove è presente un allargamento di sezione fino a $90m^2$ per una lunghezza di 390m (figura 7). In corrispondenza dell'inizio e della fine della stazione sono presenti due pozzi di ventilazione comunicanti con l'esterno di sezione pari a $2m^2$ (ognuno) mentre a circa 110m dalle estremità dell'allargamento ci sono due passaggi che collegano sia l'altro fornice sia la banchina con l'esterno. Uno schema approssimato è rappresentato in figura 8 dove, per comodità si è introdotta una coordinata (x) che ha origine all'estremità sinistra del tunnel.

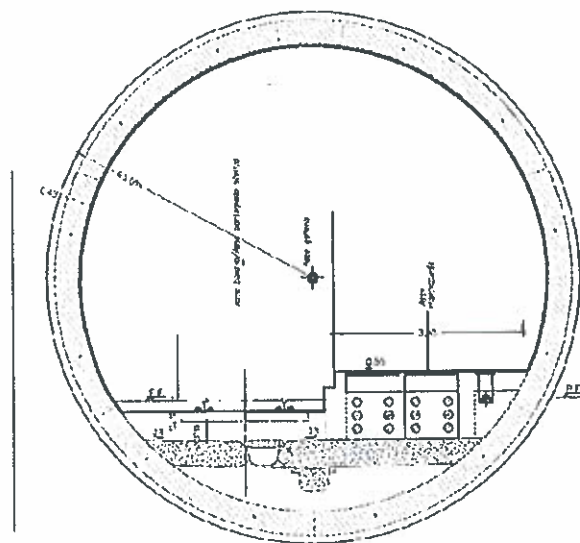


Figura 6: sezione standard del tunnel con binario singolo con superficie di $51m^2$ e perimetro "bagnato" (linea spessa) di 27.6m.

Come primo treno si considera un ETR500 che viaggia da sinistra verso destra con una velocità costante lungo la tratta pari a 160Km/h (fonte: committente).

La dinamica del passaggio del treno è riassunta nelle immagini delle figure 9 e 10 che verranno di

seguito commentate: quando il treno entra in galleria spinge l'aria davanti alla sua testa producendo un'onda di compressione che si propaga all'incirca alla velocità del suono e, pertanto, percorre il tunnel più rapidamente del treno (figura 9a).

Questa onda di pressione lascia a valle del suo fronte un fluido accelerato che quindi si mette in movimento nella stessa direzione del treno. Dopo circa 10s (figura 9b) l'onda ha raggiunto la stazione Papardo dove si nota una discontinuità nella velocità dell'aria dovuta alla variazione di sezione (e la conseguente variazione di velocità secondo la legge delle aree). In figura 9c ($t=15s$) la compressione ha raggiunto l'uscita della galleria e, incontrando una superficie a pressione costante, si riflette come onda di espansione che si propaga in direzione opposta a quella di avanzamento del treno (figura 9d) producendo un'ulteriore accelerazione dell'aria della galleria. La riflessione dell'onda con cambio di natura (compressione/espansione) continua durante il transito del treno nel tunnel che, pur con complicate interazioni, continua ad accelerare l'aria. Nelle figure 9e-f si nota come all'interno della stazione si hanno delle variazioni di velocità dovute ai pozzi di ventilazione ed ai vari passaggi. Infatti la sovrappressione prodotta dal treno tende a produrre delle correnti anche in questi condotti aggiuntivi e, come risultato, si ha che la velocità dell'aria nel tunnel dopo la stazione ($x>2800m$) risulta costantemente minore del tratto prima della stazione ($x<2400m$) nonostante le sezioni siano uguali. Ad un tempo di circa 60s (figura 10a) il treno transita in stazione e dopo questo tempo si ha un'inversione di tendenza rispetto a quanto descritto in figura 9. Succede, infatti, che poiché il treno produce a valle della sua coda una depressione, questa "richiamerà" aria non solo dall'ingresso del tunnel ma anche da tutti i passaggi presenti in galleria. L'effetto sarà quindi di produrre velocità nel tunnel dopo la stazione ($x>2800m$) maggiori del tratto che precede la stessa ($x<2400m$) e correnti in stazione la cui intensità sarà crescente con x . Per $t=100s$ (figura 10c) si ha l'uscita del treno dal tunnel e tutto ciò che rimane sarà un moto di trascinamento residuo dell'aria. A causa dell'attrito infatti le onde durante le varie riflessioni si indeboliscono progressivamente e con esse la corrente generata all'interno del tunnel. Tuttavia poiché l'attrito dipende dalla velocità della corrente, al rallentare di quest'ultima diminuisce anche l'azione frenante e come risultato finale si ha che la velocità della corrente nel tunnel diminuisce esponenzialmente nel tempo e tende a persistere con basse velocità anche per tempi molto lunghi dopo l'uscita del treno. E' stato comunque stimato che già dopo 200s le velocità massime nel tunnel sono minori di 1.5m/s mentre nella stazione non superano 0.7m/s; tali valori sono ampiamente al di sotto dei valori accettati per il comfort dei passeggeri in attesa sulla banchina e comunque dello stesso ordine o inferiori rispetto a delle correnti che eventuali sistemi di ventilazione o forzanti atmosferiche possono generare.

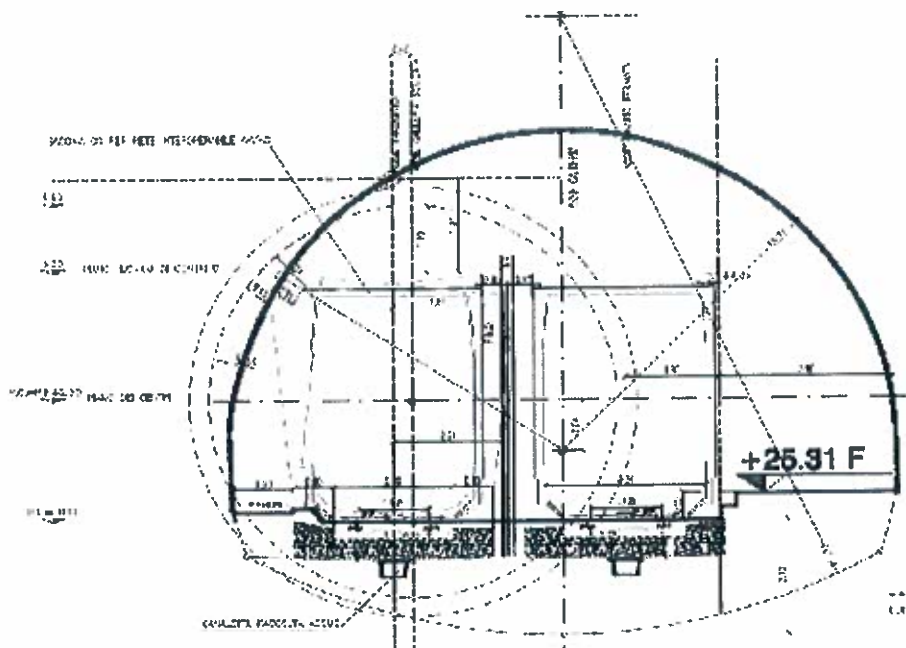


Figura 7: sezione allargata per transito in stazione con doppio binario: superficie $90m^2$ e perimetro "bagnato" (linea spessa) $37.4m$.

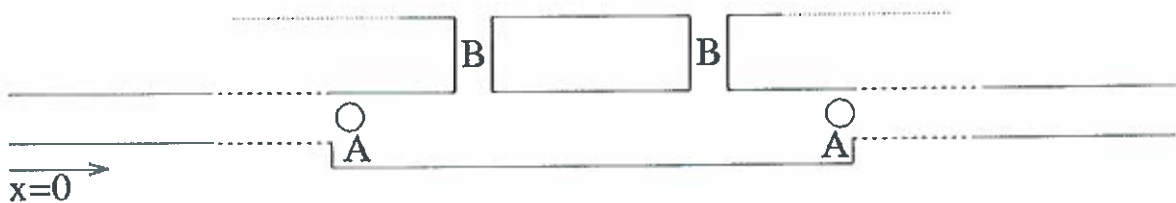


Figura 8: schema di un singolo fornice del tunnel S. Agata con la stazione Papardo: i pozzi di ventilazione sono indicati con "A" ed i passaggi di collegamento con l'altro fornice e con l'uscita della stazione con "B".

Per completezza si forniscono anche nelle figure 11 e 12 le evoluzioni delle pressioni per gli stessi istanti in cui sono state riportate le velocità dell'aria nelle figure 9 e 10. Oltre a confermare la dinamica già illustrata questi grafici sono utili per apprezzare le variazioni di pressione prodotte dal fenomeno i cui valori eccessivi possono compromettere sia l'integrità delle strutture che il comfort dei passeggeri. Si può notare, tuttavia, che le massime variazioni di pressione sono di circa 1.2 Kpa (tra testa e coda del treno) che, per una velocità di 160 Km/h , si verifica in un intervallo di tempo di circa $7.3s$. Tale valore rientra ampiamente nei limiti suggeriti dalle compagnie ferroviarie delle varie nazioni.

Mentre nelle figure 9-12 sono state riportate alcune grandezze di interesse a tempi prefissati lungo tutta l'estensione del tunnel, in figura 13 sono rappresentate le evoluzioni temporali della velocità dell'aria in quattro punti fissi di misura; tali punti sono stati presi tutti all'interno della stazione Papardo e possono essere considerati i "venti" avvertiti da un passeggero in attesa in banchina da quanto un treno entra nel tunnel ($t=0$) fino a circa $100s$ dopo l'uscita del treno dal

tunnel stesso. Innanzi tutto si osserva come, fino a quando l'onda di compressione non raggiunge la stazione (circa 10s) l'aria non si mette in movimento nonostante il treno stia già impegnando il tunnel. E' anche evidente come prima che il tunnel attraversi la stazione (circa 70s) le sezioni più a monte della galleria siano interessate da correnti di maggiore intensità mentre l'opposto accade dopo che il treno ha superato la galleria (come già spiegato ciò è dovuto alla presenza di collegamenti della stazione con l'esterno attraverso i quali l'aria può essere espulsa o aspirata a seconda delle differenze di pressione). Infine, dopo che il treno ha abbandonato il tunnel permane un moto di trascinamento residuo dell'aria che decresce esponenzialmente (trascurando le varie riflessioni delle onde) nel tempo. In ogni caso, nelle condizioni in cui ci siamo posti il modello non ha mai prodotto stime di velocità nella stazione superiori a 4m/s, valori che sono ampiamente tollerabili per il comfort e la sicurezza dei passeggeri in banchina. E' tuttavia fondamentale osservare che il presente modello essendo quasi-monodimensionale può fornire solamente valori di **velocità mediati sulla sezione**; ciò implica che ogni valore di x è caratterizzato da un unico valore di velocità che, sebbene fornisca utili indicazioni, non può distinguere se in qualche punto ci siano valori di velocità più o meno elevati che comunque, compensati da basse velocità in altri punti della stessa sezione danno una media accettabile. Per sciogliere questa riserva sono necessarie simulazioni tridimensionali che costituiscono la seconda parte di questa attività di studio.

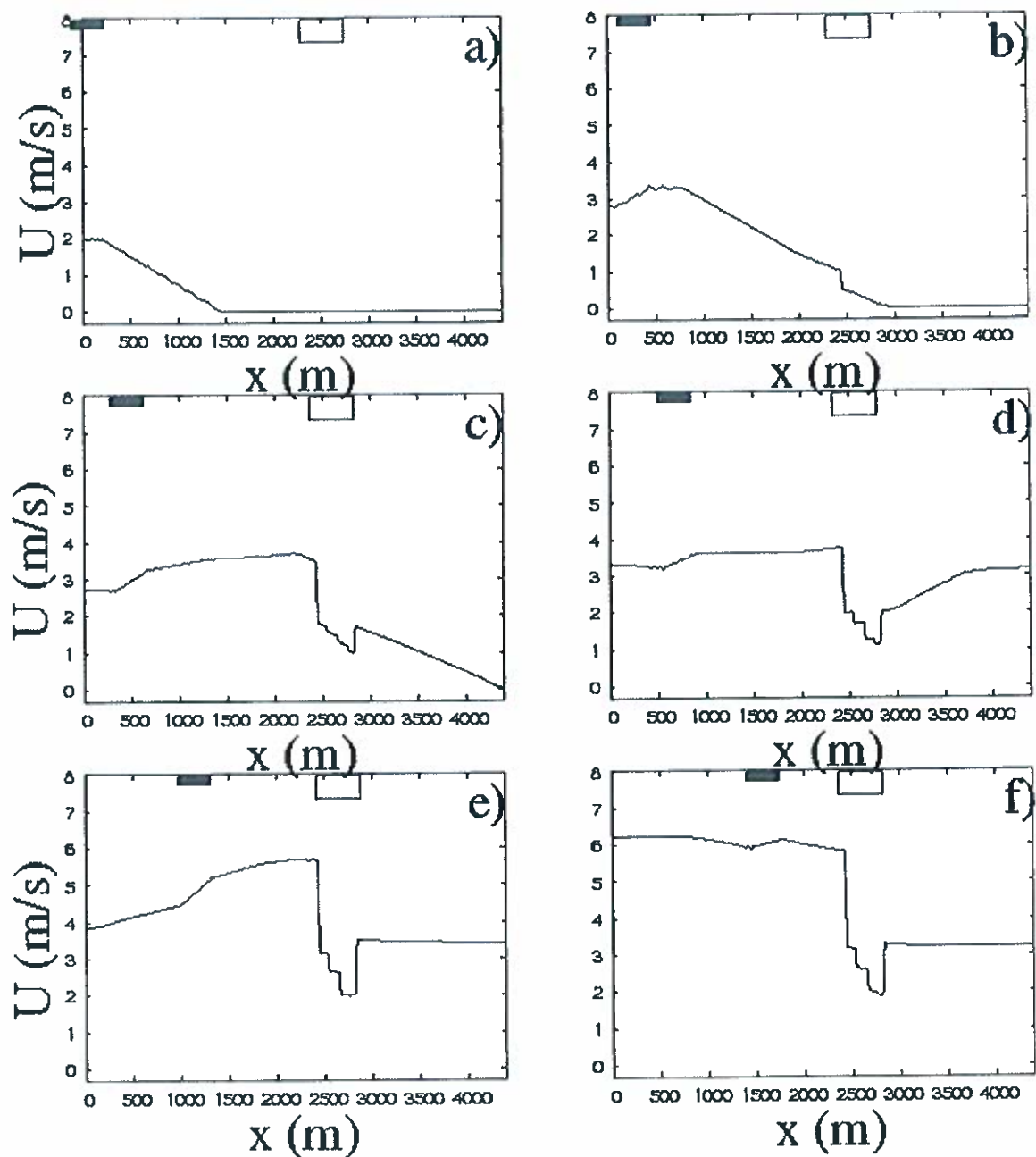


Figura 9: Profili di velocità lungo la lunghezza della galleria S. Agata al passaggio di un treno ETR500 a vari istanti: a) $t=5$ s (il treno è appena entrato in galleria), b) $t=10$ s (l'onda di compressione ha raggiunto la stazione), c) $t=15$ s (l'onda raggiunge l'uscita del tunnel), d) $t=20$ s (l'onda si riflette all'uscita del tunnel), e) $t=30$ s, f) $t=40$ s. Nelle figure a)-f) la posizione del treno in galleria è indicata con un rettangolino nero in alto mentre la posizione della stazione Papardo è riportata con un rettangolino bianco. La discontinuità nella velocità circa a $x=2390$ m indica la posizione della stazione nella galleria.

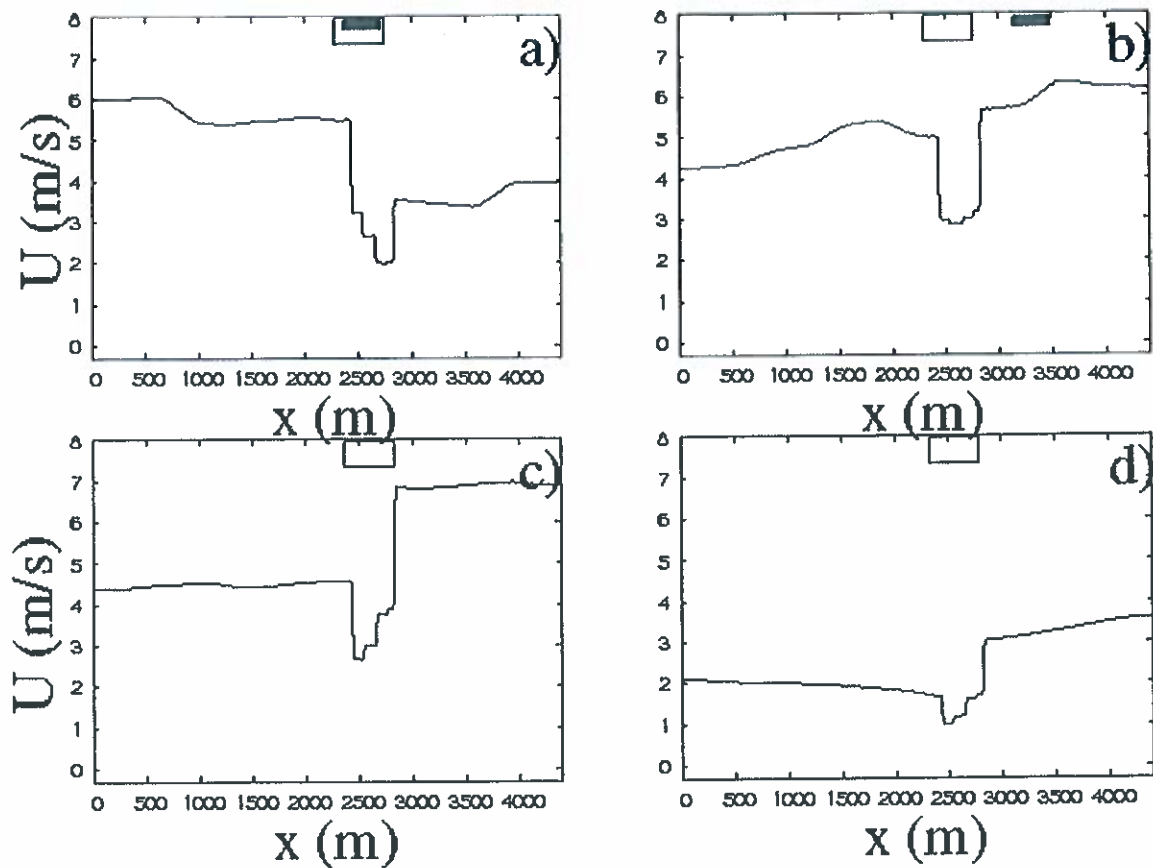


Figura 10: Profili di velocità lungo la lunghezza della galleria S. Agata al passaggio di un treno E' TR500 a vari istanti: **a)** $t=60$ s (il treno transita in stazione), **b)** $t=80$ s (il treno ha superato la stazione), **c)** $t=100$ s (il treno esce del tunnel), **d)** $t=130$ s (rimane del moto residuo). Nelle figure **a)**-**b)** la posizione del treno in galleria è indicata con un rettangolino nero in alto mentre la posizione della stazione Papardo è riportata con un rettangolino bianco. La discontinuità nella velocità circa a $x=2390$ m indica la posizione della stazione nella galleria.

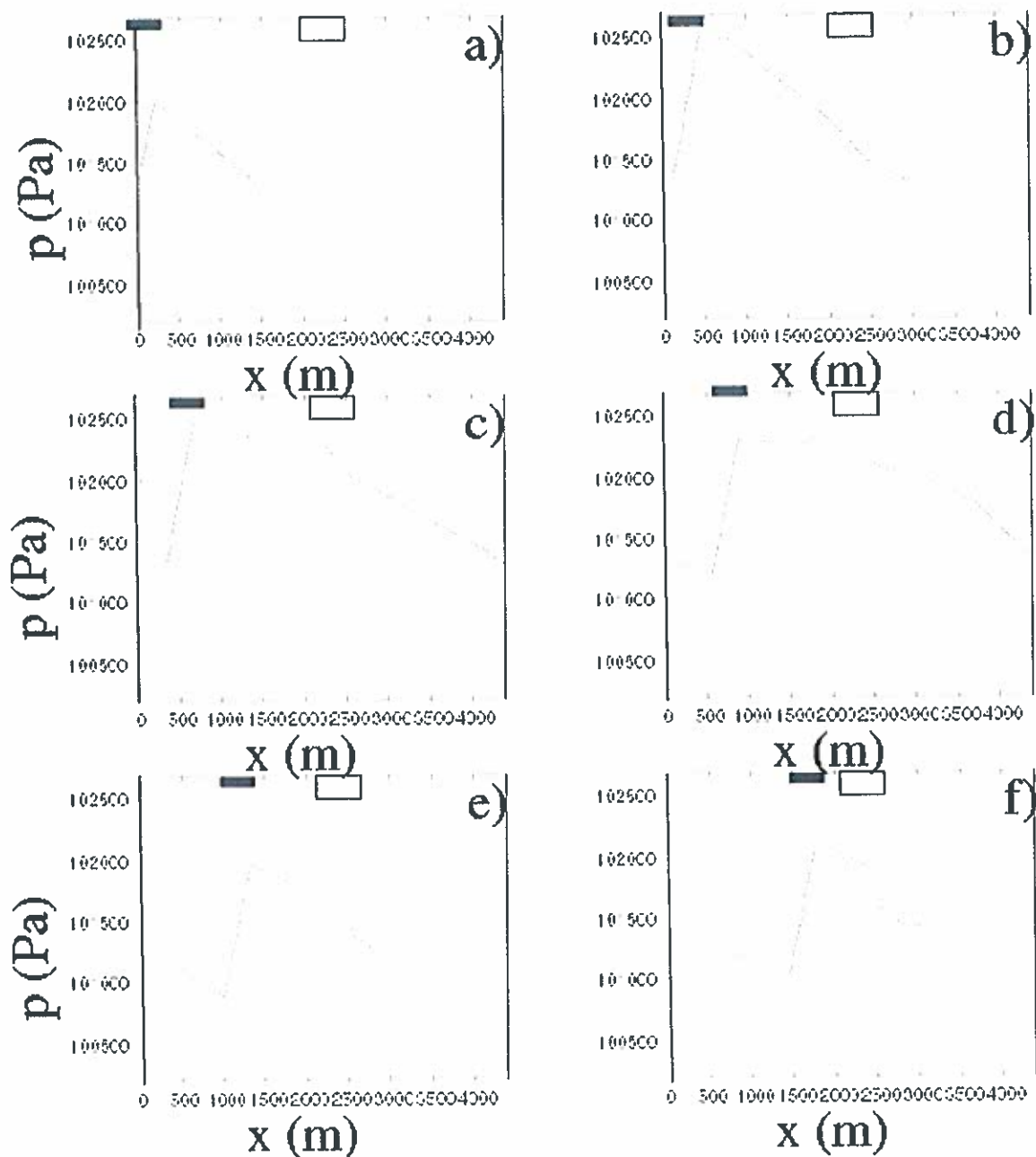


Figura 11: Profili di pressione lungo la lunghezza della galleria S. Agata al passaggio di un treno ETR500 a vari istanti: a) $t=5$ s (il treno è appena entrato in galleria), b) $t=10$ s (l'onda di compressione ha raggiunto la stazione), c) $t=15$ s (l'onda raggiunge l'uscita del tunnel), d) $t=20$ s (l'onda si riflette all'uscita del tunnel), e) $t=30$ s, f) $t=40$ s. Nelle figure a)-f) la posizione del treno in galleria è indicata con un rettangolino nero in alto mentre la posizione della stazione Papardo è riportata con un rettangolino bianco. La discontinuità nella velocità circa a $x=2390$ m indica la posizione della stazione nella galleria.

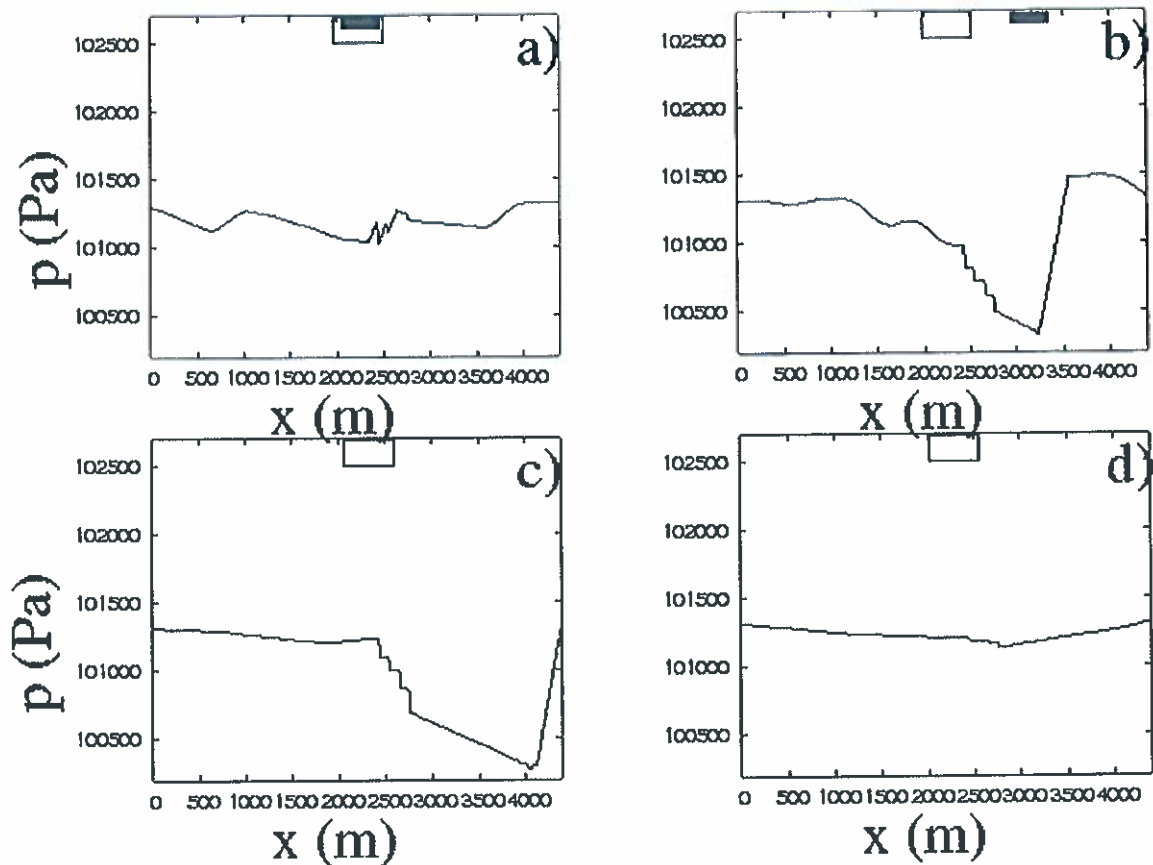


Figura 12: Profili di pressione lungo la lunghezza della galleria S. Agata al passaggio di un treno ETR500 a vari istanti: **a)** $t=60$ s (il treno transita in stazione), **b)** $t=80$ s (il treno ha superato la stazione), **c)** $t=100$ s (il treno esce del tunnel), **d)** $t=130$ s (rimane del moto residuo). Nelle figure **a)**-**b)** la posizione del treno in galleria è indicata con un rettangolino nero in alto mentre la posizione della stazione Papardo è riportata con un rettangolino bianco. La discontinuità nella velocità circa a $x=2390$ m indica la posizione della stazione nella galleria.

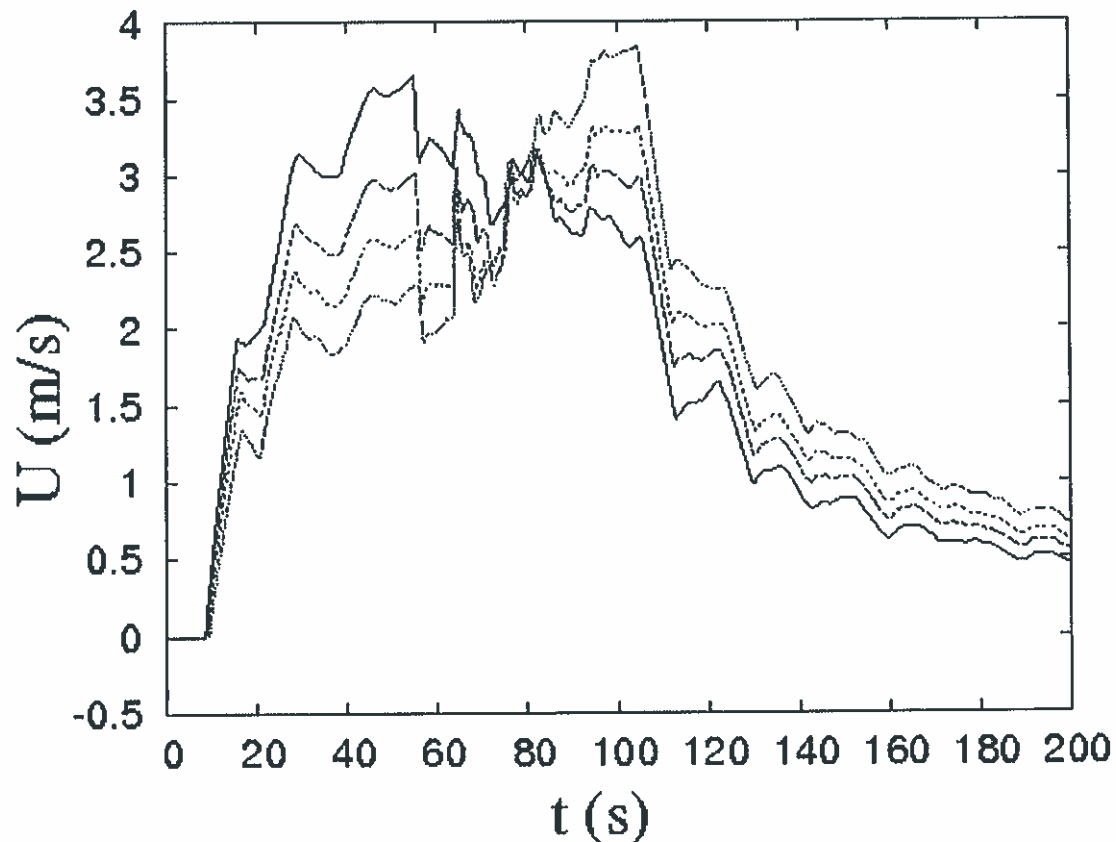


Figura 13: Evoluzione temporale della velocità dell'aria in 4 sezioni della stazione Papardo ($x=2470$ linea continua, $x=2560$ linea tratteggiata, $x=2660$ linea puntinata, $x=2750$ linea tratto-punto) al passaggio di un treno ETR500.

Tunnel S. Agata, Treno merci

La fenomenologia risulta sostanzialmente uguale al caso precedente ma con differenti valori delle grandezze nel caso in cui il treno che attraversa il tunnel sia un treno merci piuttosto che un treno ad alta velocità ETR500. I treni merci, infatti, sono tipicamente molto più lunghi e meno aerodinamici dei treni passeggeri e viaggiano a velocità più contenute; in questo caso, in particolare, seguendo le indicazioni del committente è stato supposto che il treno avanzi con una velocità costante pari a 120Km/h. Confrontando tale valore con quello per il treno ad alta velocità (160 Km/h) è immediatamente evidente come, a causa della ridotta velocità del convoglio, il tempo di attraversamento del tunnel è di circa il 30% superiore (130s contro 98s). Questa circostanza, unita al fatto che il coefficiente di resistenza di un treno merci sia molto più alto che per un treno ad alta velocità, rende l'impulso totale (cioè l'integrale per il tempo di

attraversamento del tunnel della forza scambia tra treno ed aria) maggiore per un treno merci rispetto ad un treno ad alta velocità.

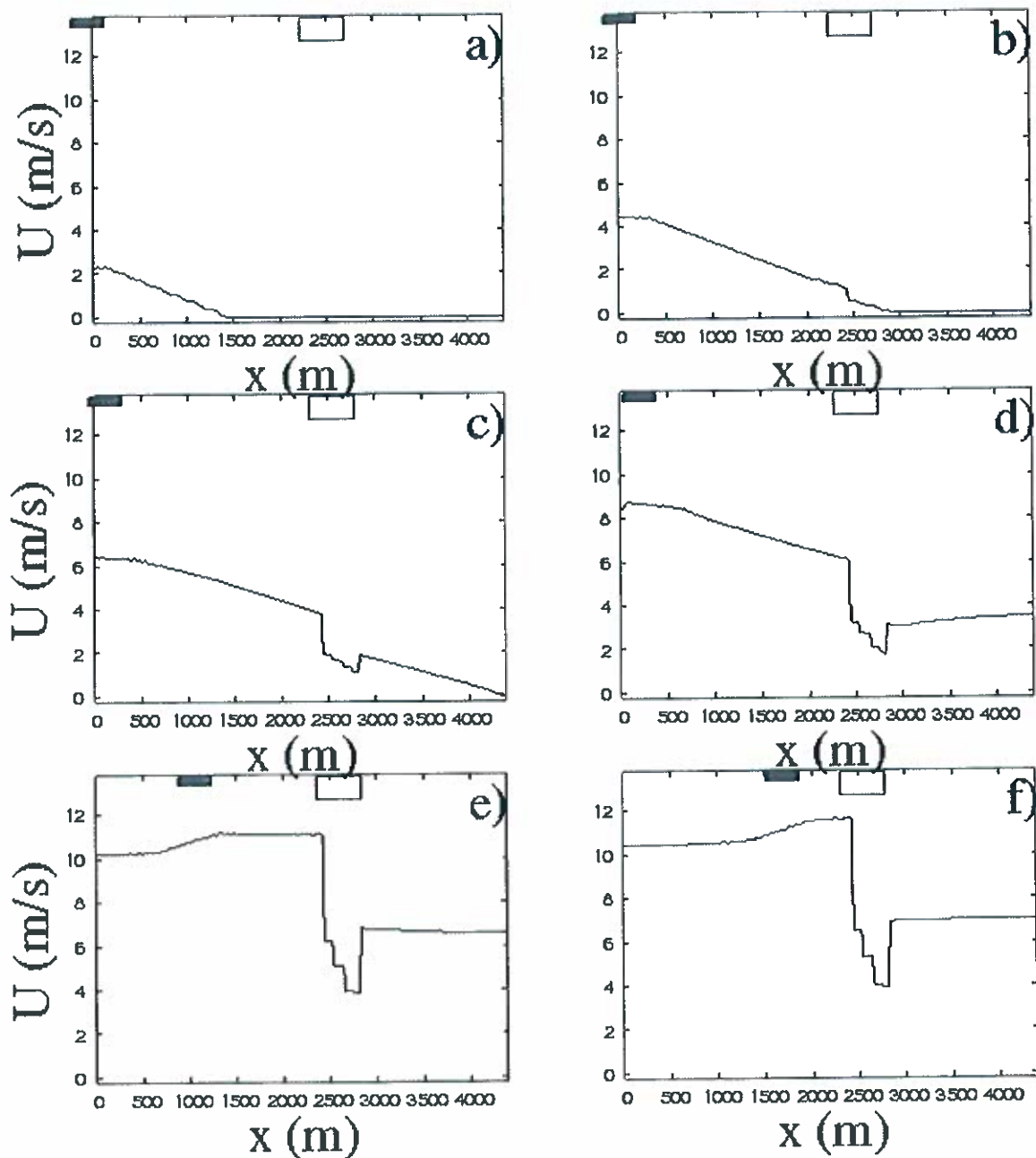


Figura 11: Profili di velocità lungo la lunghezza della galleria S. Agata al passaggio di un treno merci a vari istanti: **a)** $t=5$ s (il treno è appena entrato in galleria), **b)** $t=10$ s (l'onda di compressione ha raggiunto la stazione), **c)** $t=15$ s (l'onda raggiunge l'uscita del tunnel), **d)** $t=20$ s (l'onda si riflette all'uscita del tunnel), **e)** $t=40$ s, **f)** $t=60$ s (il treno non ha ancora raggiunto la stazione). Nelle figure **a)**-**f)** la posizione del treno in galleria è indicata con un rettangolino nero in alto mentre la posizione della stazione Papardo è riportata con un rettangolino bianco. La discontinuità nella velocità circa a $x=2390$ m indica la posizione della stazione nella galleria.

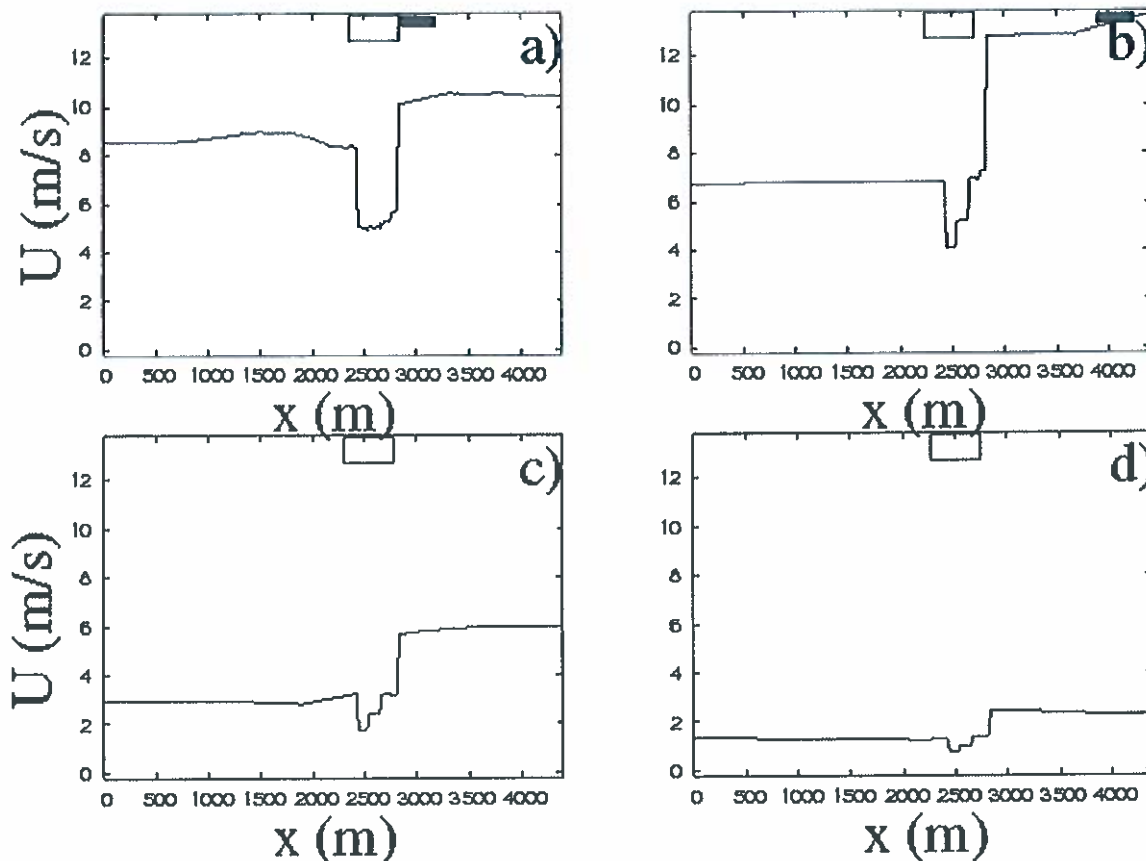


Figura 15: Profili di velocità lungo la lunghezza della galleria S. Agata al passaggio di un treno merci a vari istanti: **a)** $t=80$ s (il treno transita in stazione), **b)** $t=100$ s (il treno ha superato la stazione), **c)** $t=130$ s (il treno esce del tunnel), **d)** $t=200$ s (rimane del moto residuo). Nelle figure **a)**-**b)** la posizione del treno in galleria è indicata con un rettangolino nero in alto mentre la posizione della stazione Papardo è riportata con un rettangolino bianco. La discontinuità nella velocità circa a $x=2390$ m indica la posizione della stazione nella galleria.

Ciò comporta una maggiore velocità della corrente prodotta dal treno come si evince dalla figura 14 in cui si può notare, dal confronto con la figura 4, che non solo la velocità massima è maggiore ma questa è sostenuta per tempi più lunghi. In aggiunta, alla fine dei 200s dell'integrazione la velocità residua della corrente risulta leggermente maggiore con velocità dell'ordine di 2m/s in corrispondenza della sezione d'uscita del tunnel.

Anche per questo caso si riportano le velocità nel tempo così come misurate in quattro sezioni della stazione Papardo (figura 16); si può notare come le prime siano quasi doppie rispetto ad i valori stimati per un treno ETR500 tuttavia anche in questo caso, risultando il valore massimo di circa 7m/s si possono ritenere all'interno del limite consentito.

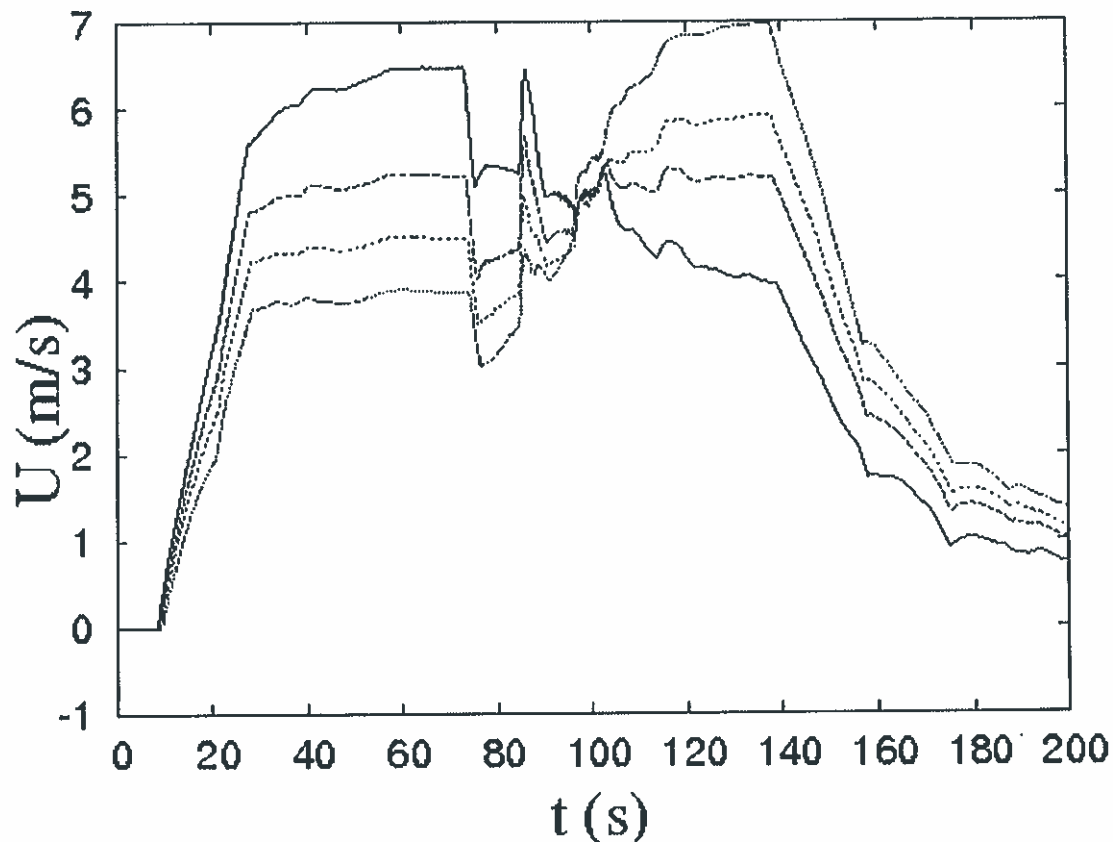


Figura 16: Evoluzione temporale della velocità dell'aria in 4 sezioni della stazione Papardo ($x=2470$ linea continua, $x=2560$ linea tratteggiata, $x=2660$ linea puntinata, $x=2750$ linea tratto-punto) al passaggio di un treno merci.

Tunnel S. Cecilia, Treno ETR500

La galleria S. Cecilia è lunga circa 11800m (dal Km 5+700 al Km 17+500 del tracciato) di sezione costante pari a $S=51\text{m}^2$ per ogni singolo fornice (figura 6), ad eccezione del tratto in corrispondenza della stazione Annunziata (al Km 9+500 del tracciato) dove è presente un allargamento di sezione fino a 90m^2 per una lunghezza di 390m (figura 7). In questo tunnel è presente una seconda stazione (Europa) al Km 13+850 del tracciato che, al contrario delle precedenti non presenta alcuna variazione di sezione rispetto alla sezione standard. Anche in questo caso in corrispondenza dell'inizio e della fine di ogni stazione sono presenti due pozzi di ventilazione comunicanti con l'esterno di sezione pari a 2m^2 (ognuno) mentre a circa 110m dalle estremità della stazione ci sono due passaggi che collegano sia l'altro fornice sia la banchina con l'esterno.

Coerentemente con i dati precedentemente utilizzati i treni ETR500 percorrono il tunnel alla velocità di 160Km/h mentre i treni merci avranno una velocità ridotta a 120Km/h. L'unica

eccezione è rappresentata dal fatto che non avendo la stazione Europa alcun allargamento di sezione nel suo attraversamento le velocità di percorrenza vengono ridotte, rispettivamente, a 90Km/h e 60Km/h per i treni ETR500 e merci; tale velocità viene mantenuta fino all'uscita del tunnel essendo quello un tratto di decelerazione per l'entrata in stazione. E' presumibile che il rallentamento del treno avvenga non direttamente all'ingresso della stazione Europa ma in qualche punto a monte della stessa; non avendo dati certi in proposito in questo studio si è supposto che i treni abbiano completato la decelerazione 150m prima dell'ingresso nella stazione Europa. Tale ipotesi è chiaramente arbitraria ma comunque plausibile ed in favore della sicurezza considerando il fenomeno di interesse.

In figura 17 sono riportati alcuni istanti salienti della dinamica dell'attraversamento del treno nel tunnel. In particolare, dopo 10s il treno ha completato l'ingresso in galleria e si nota l'onda di compressione che avanza mentre, a causa della notevole lunghezza del tunnel, il fronte di compressione raggiunge l'uscita solo dopo 40s (figura 17b). Il treno attraversa la stazione Annunziata dopo 90s (figura 17c) e la stazione Europa dopo 190s (figura 17d). E' bene ricordare che dopo circa 180s prima dell'ingresso nella seconda stazione il treno riduce la sua velocità da 160Km/h a 90Km/h per poter transitare con velocità ridotta. L'ultima velocità viene mantenuta fino all'uscita del tunnel che avviene dopo circa 240s (figura 17e) e dei moti residui permangono ancora dopo 400s (figura 17f).

Analogamente ai casi precedenti, anche per il tunnel S. Cecilia vengono riportate le velocità nel tempo in alcune sezioni rappresentative, vengono riportate in particolare i dati per quattro sezioni della stazione Annunziata (figura 18) e quattro per la stazione Europa (figura 19). Si può notare come il rallentamento del treno intorno a $t=180s$ abbia un effetto positivo sulle velocità massime che comunque per entrambe le stazioni si mantengono entro limiti accettabili. Si nota anche che, a parità di treno e di sezione, per questo tunnel le velocità massime risultano lievemente più basse rispetto al caso precedente. Ciò è probabilmente dovuto alla maggiore lunghezza del tunnel che produce un maggiore attrito ed alla presenza di due stazioni con i relativi condotti di ventilazione che forniscono vie alternative alla corrente principale.

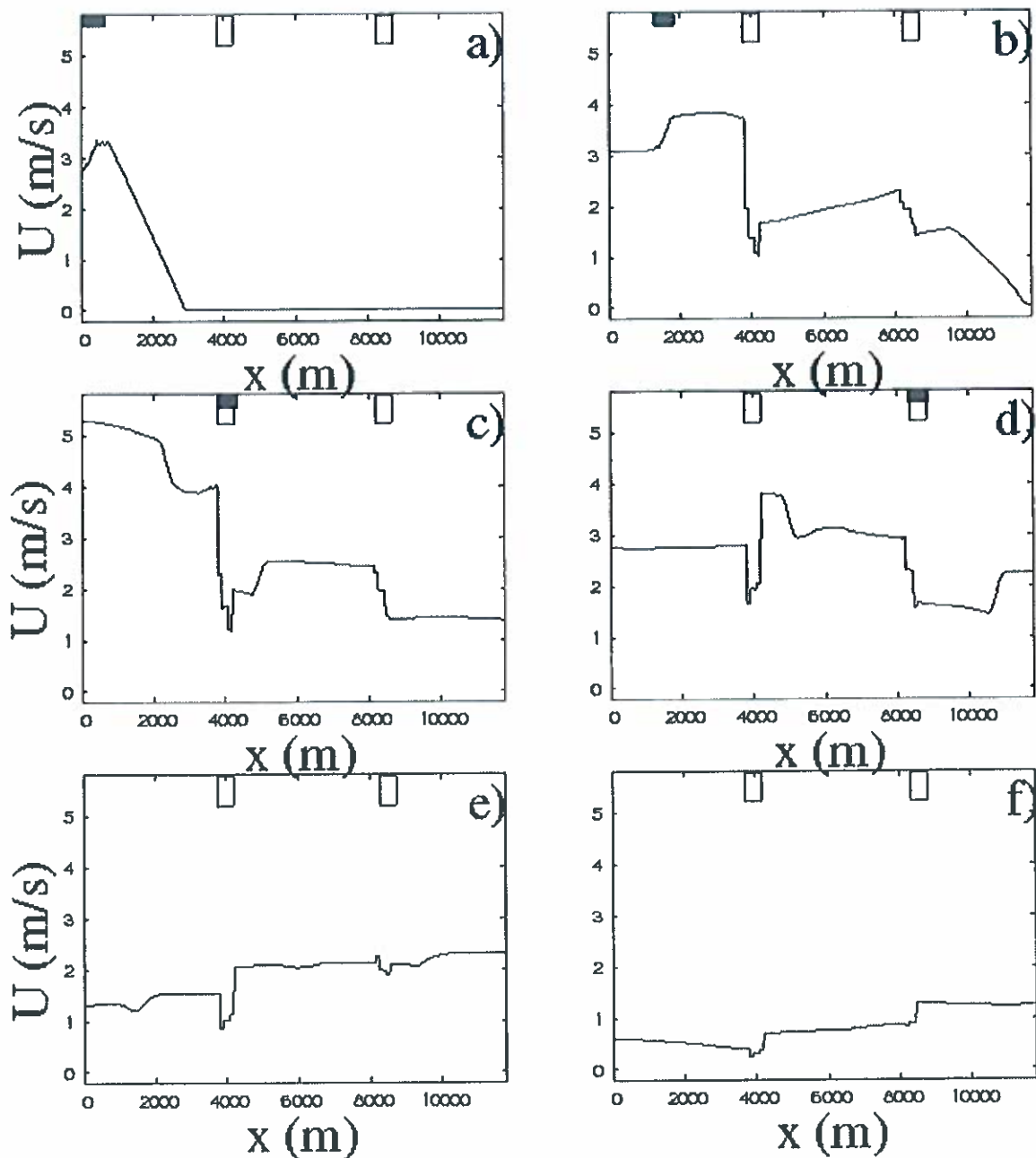


Figura 17: Profili di velocità lungo la lunghezza della galleria S. Cecilia al passaggio di un treno ETR500 a vari istanti: **a)** $t=10$ s (il treno ha completato l'ingresso in galleria in galleria), **b)** $t=40$ s (l'onda di compressione ha raggiunto la fine del tunnel), **c)** $t=90$ s (il treno transita nella stazione Annunziata), **d)** $t=190$ s (il treno transita nella stazione Europa ed ha già ridotto la sua velocità a 90Km/h), **e)** $t=240$ s (il treno è appena uscito dal tunnel), **f)** $t=400$ s (si osserva del moto residuo). Nelle figure **a)**-**d)** la posizione del treno in galleria è indicata con un rettangolino nero in alto mentre le posizioni delle stazioni Annunziata ed Europa sono riportate con un rettangolino bianco.

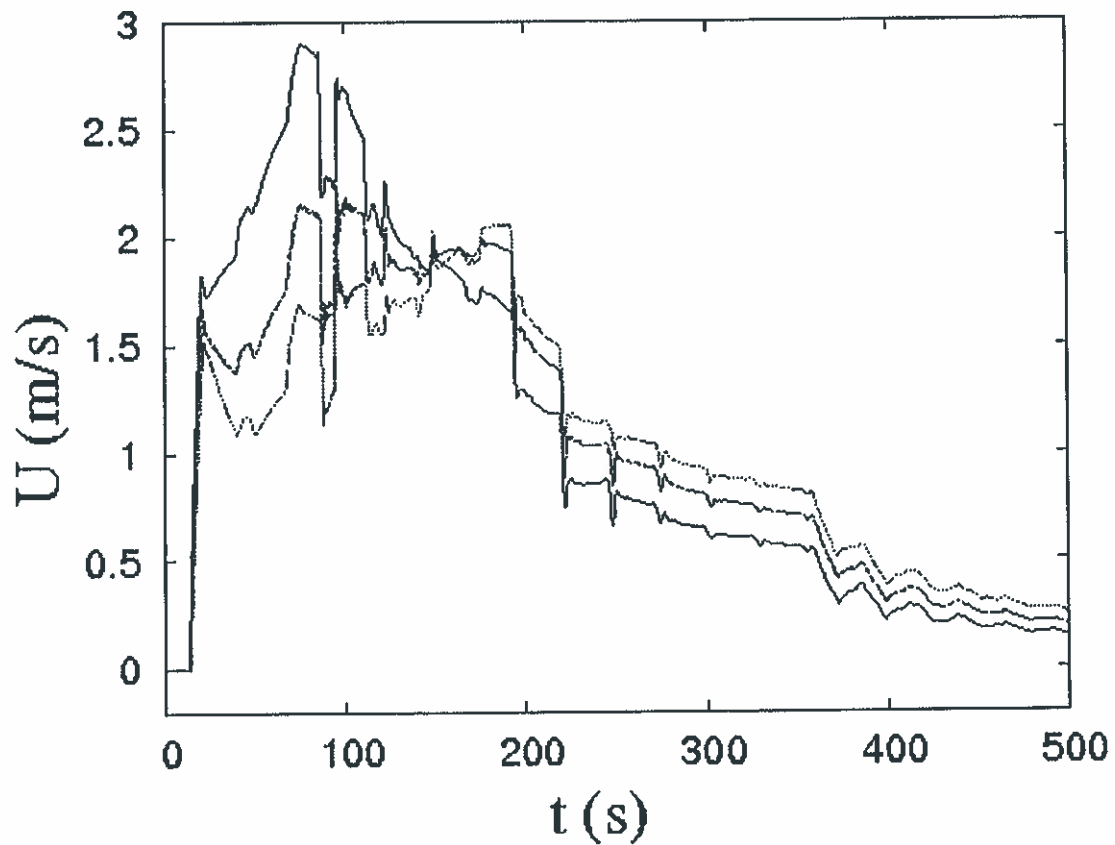


Figura 18: Evoluzione temporale della velocità dell'aria in 4 sezioni della stazione Annunziata ($x=3810$ linea continua, $x=3920$ linea tratteggiata, $x=4010$ linea puntinata, $x=4100$ linea tratto-punto) al passaggio di un treno ETR500.

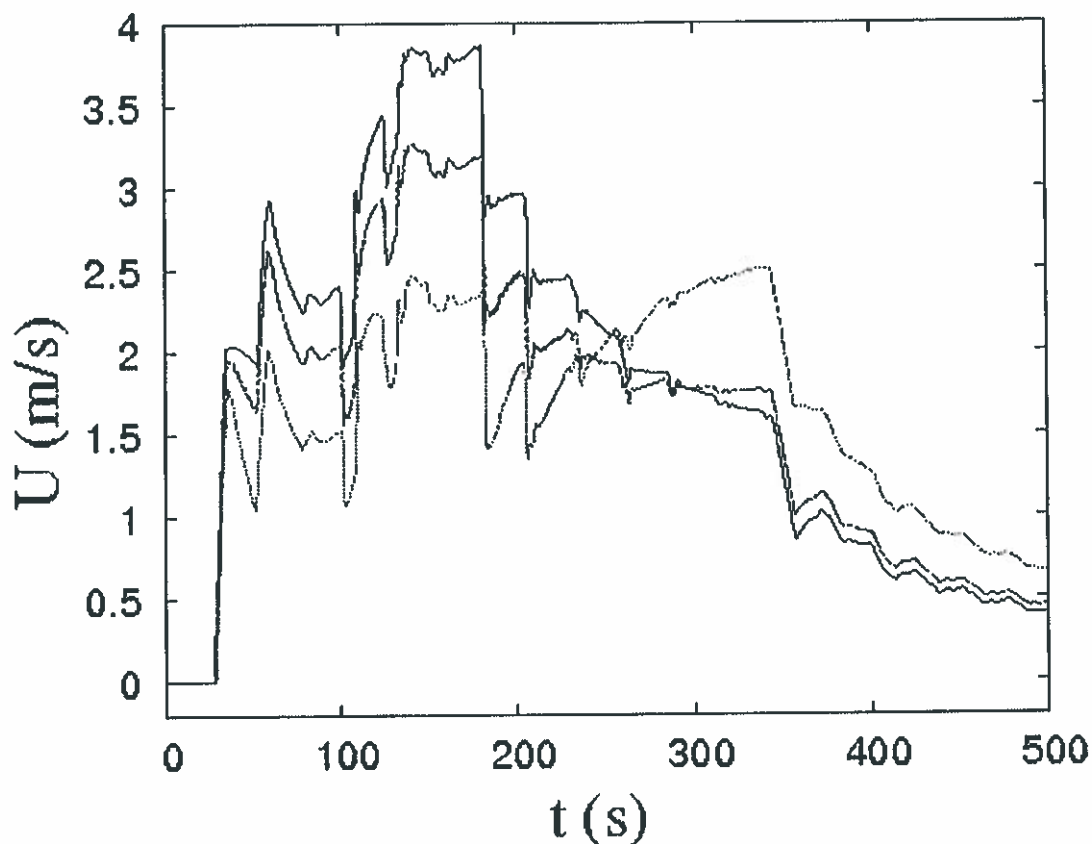


Figura 19: Evoluzione temporale della velocità dell'aria in 4 sezioni della stazione Europa ($x=8170$ linea continua, $x=8260$ linea tratteggiata, $x=8360$ linea puntinata, $x=8450$ linea tratto-punto) al passaggio di un treno ETR500.

Tunnel S. Cecilia, Treno merci

Come ultimo caso si considera il transito nel tunnel S. Cecilia di un treno merci con le medesime caratteristiche rispetto a quello transitato nel tunnel S. Agata. Si può notare che tutti i fenomeni precedentemente descritti vengono confermati anche per questo caso. Le figure 20, 21 e 22 riportano i risultati come illustrati per i casi precedenti e si può notare che anche per questo tunnel un treno merci induce velocità superiori rispetto a quelle prodotte da un treno ad alta velocità. In particolare la figura 22 mostra come le correnti più intense (circa 7m/s) si raggiungano nella stazione Europa immediatamente prima che il convoglio riduca la sua velocità da 120Km/h a 60Km/h.

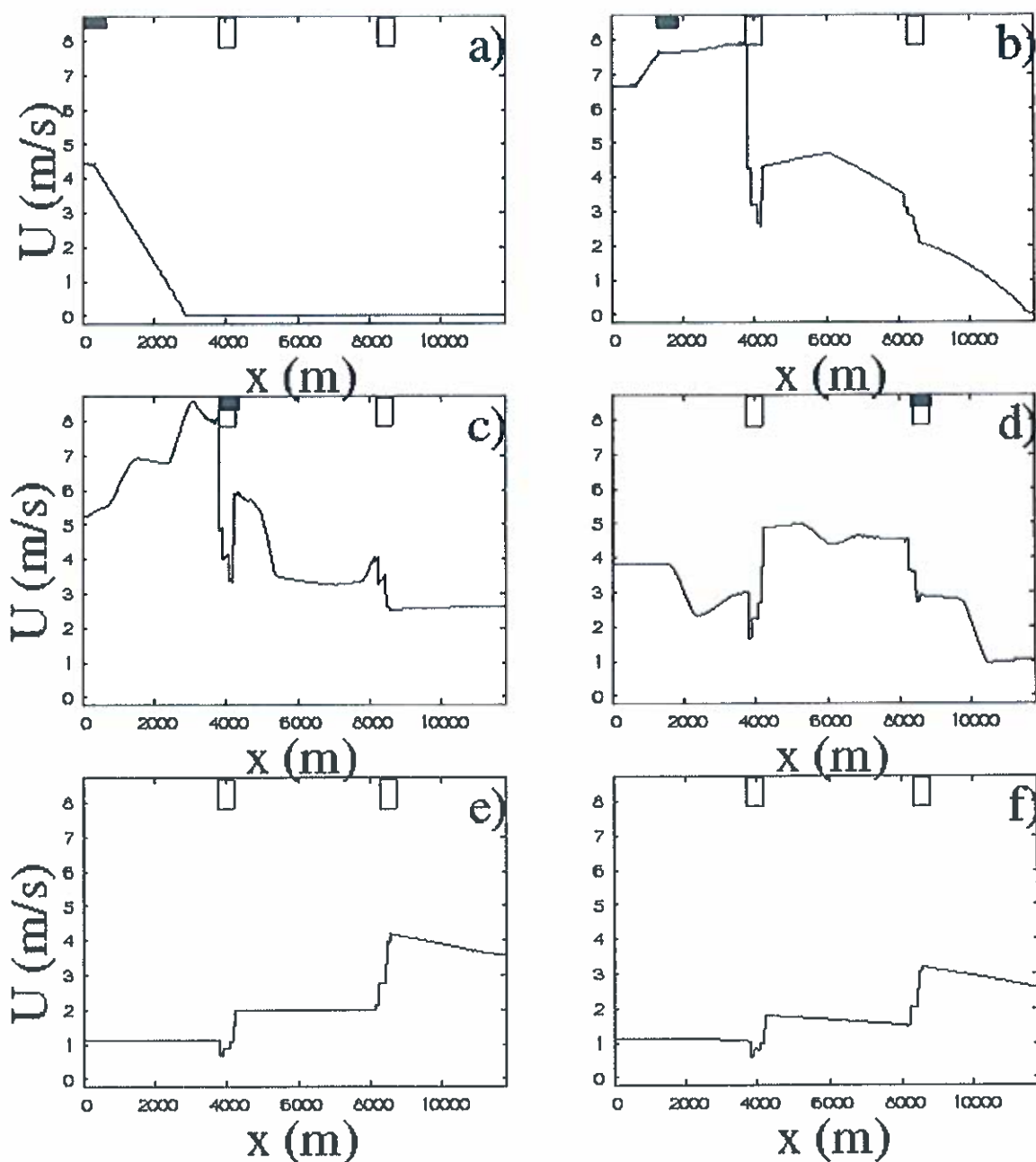


Figura 20: Profili di velocità lungo la lunghezza della galleria S. Cecilia al passaggio di un treno merci a vari istanti: a) $t=10$ s (il treno sta entrando in galleria), b) $t=40$ s (l'onda di compressione ha raggiunto la fine del tunnel), c) $t=130$ s (il treno transita nella stazione Annunziata), d) $t=260$ s (il treno transita nella stazione Europa ed ha già ridotto la sua velocità a 60Km/h), e) $t=480$ s (il treno è appena uscito dal tunnel), f) $t=500$ s (si osserva del moto residuo). Nelle figure a)-d) la posizione del treno in galleria è indicata con un rettangolino nero in alto mentre le posizioni delle stazioni Annunziata ed Europa sono riportate con un rettangolino bianco.

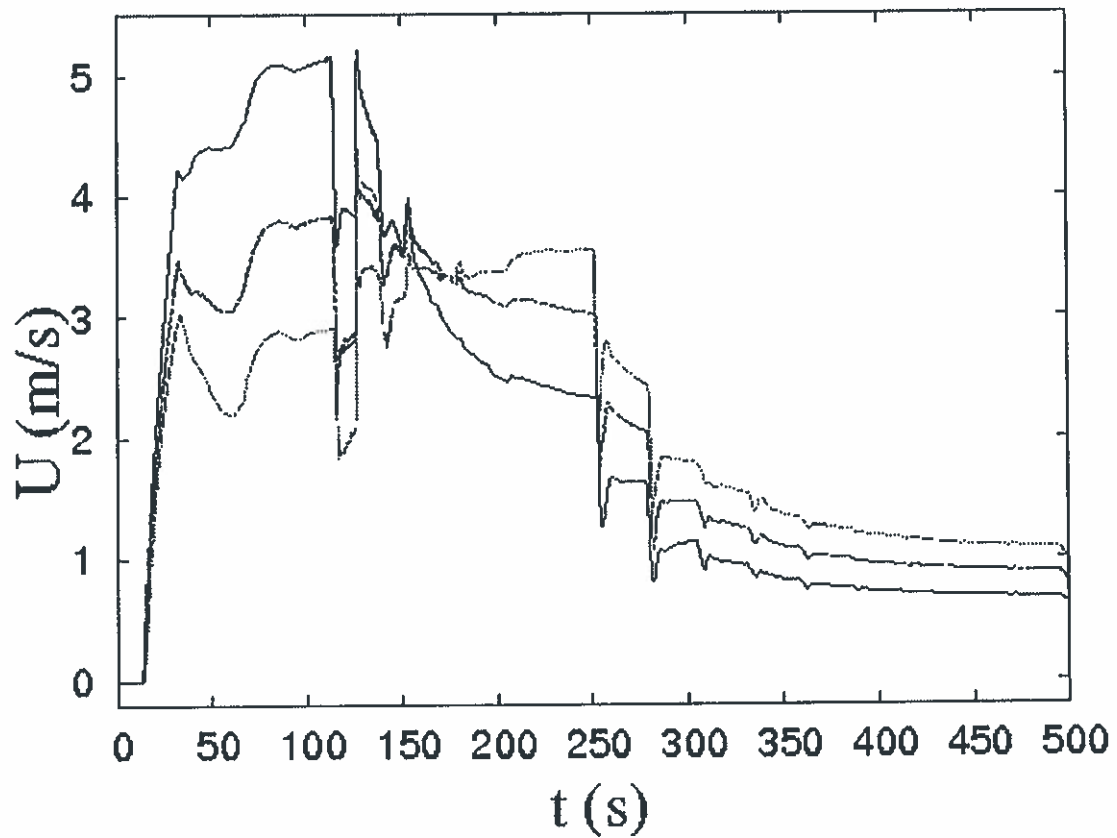


Figura 21: Evoluzione temporale della velocità dell'aria in 4 sezioni della stazione Annunziata ($x=3810$ linea continua, $x=3920$ linea trattoggiata, $x=4010$ linea puntinata, $x=4100$ linea tratto-punto) al passaggio di un treno merci.

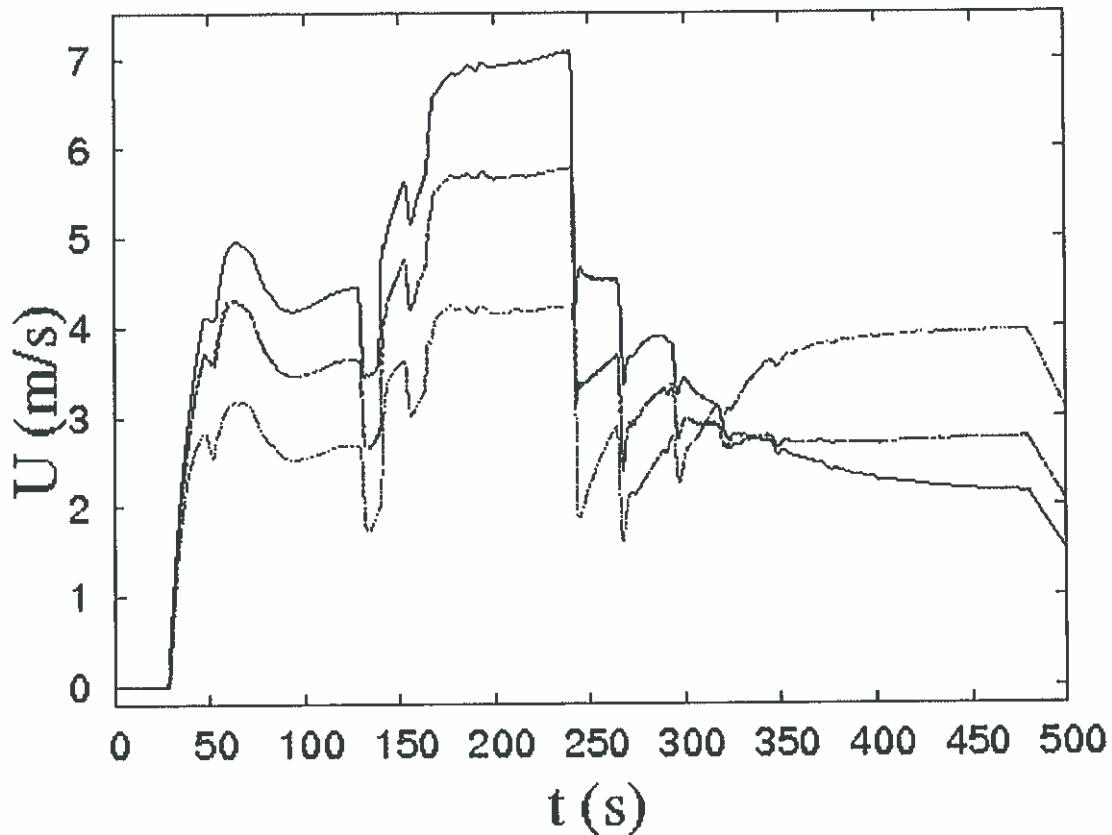


Figura 22: Evoluzione temporale della velocità dell'aria in 4 sezioni della stazione Europa ($x=8170$ linea continua, $x=8260$ linea tratteggiata, $x=8360$ linea puntinata, $x=8450$ linea tratto-punto) al passaggio di un treno merci.

PARTE SECONDA: FENOMENI TRIDIMENSIONALI

Equazioni e modello numerico

Nella prima parte di questo studio, dovendo analizzare essenzialmente la generazione, la propagazione e la dinamica di onde all'interno di un tunnel, è stato sufficiente utilizzare un modello quasi-monodimensionale in cui oltre alla dinamica del fenomeno lungo la direzione longitudinale si potessero tenere in debito conto le variazioni di sezione del tunnel in prossimità della stazione.

In questa seconda fase, al contrario, non sarà possibile beneficiare dell'ipotesi di unidimensionalità del flusso in quanto è necessario analizzare la fluidodinamica all'interno delle stazioni nel momento in cui il treno transita nelle stesse generando così fenomeni completamente tridimensionali. A tal fine bisogna ricorrere alle equazioni di Navier-Stokes in un dominio la cui forma riproduca le caratteristiche geometriche essenziali della stazione in esame e del treno in transito. Riguardo al transito del treno si è voluto, da una parte, analizzare in dettagli i fenomeni transitori indotti da un treno "corto" (la cui lunghezza fosse minore di quella della banchina della stazione) e dall'altra

considerare anche il caso del passaggio di treni “lunghi” (di lunghezza maggiore della stazione). Nel primo caso è risultato necessario considerare anche il fenomeno di ingresso ed uscita del treno dalla stazione mentre nel secondo caso è stato possibile limitarsi al momento in cui il treno in moto occupasse l’intera lunghezza della stazione.

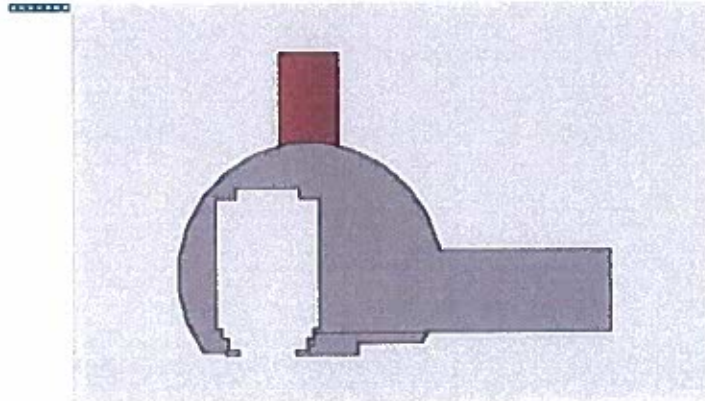


Figura 23: Sezione trasversale tipo della stazione senza allargamento di sezione (Europa) in cui è stata riportata, per riferimento la sezione del treno, la sagoma di uno dei pozzi di ventilazione (in rosso) e parte del corridoio di collegamento con l’altro fornice ed i passaggi interni della stazione.

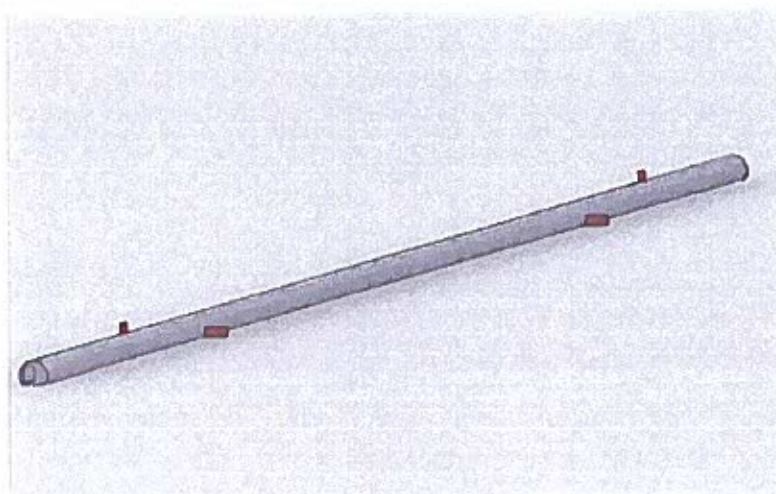


Figura 24: Vista prospettica della stazione senza allargamento di sezione (Europa); in rosso sono rappresentati i pozzi di ventilazione e parte dei corridoi di collegamento con l’altro fornice ed i passaggi interni della stazione.

Le equazioni del moto sono state risolte con un modello ai volumi finiti o alle differenze finite utilizzando griglie di calcolo con un numero di elementi compreso tra 800000 ed 1600000. Per le simulazioni con la dinamica transitoria del treno è stato utilizzato un modello sviluppato all’interno del dipartimento di Ingegneria Meccanica dell’Università di Roma “Tor Vergata” e già validato per numerose applicazioni industriali e di ricerca. I casi con il treno che occupa l’intera banchina della stazione sono stati invece simulati con il codice commerciale Fluent (della ditta Ansys) che costituisce uno standard *de facto* per le simulazioni complesse di tipo applicativo. La

fenomenologia della turbolenza, nel primo caso è stata modellata con procedure non stazionarie di tipo Large-Eddy-Simulation mentre nel secondo caso con modelli stazionari $K-\epsilon$.

Nelle figure 23-26 sono rappresentate le stazioni oggetto dell'analisi sia per quanto riguarda le loro sezioni tipo che le viste prospettiche. In entrambi i casi si è considerata una dimensione longitudinale del dominio di circa 500 metri, ogni stazione era dotata di 2 pozzi di ventilazione (all'inizio ed alla fine della banchina) di 2 metri di diametro ed ogni tunnel aveva due passaggi laterali che lo collegavano sia al tunnel per la direzione di marcia opposta che ai passaggi interni della stazione.

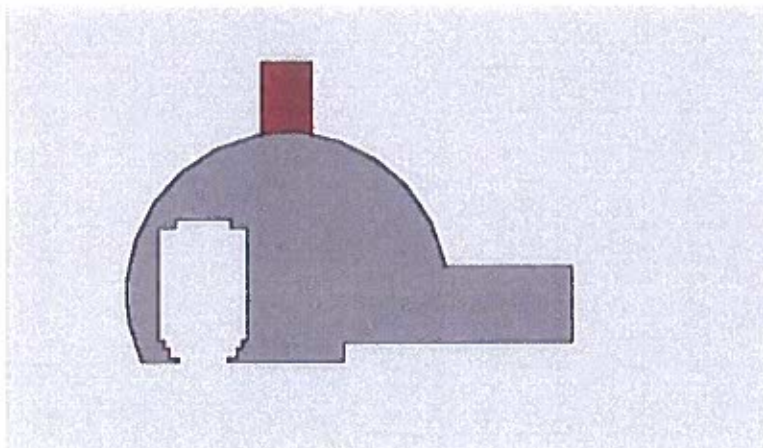


Figura 25: Sezione trasversale tipo delle stazioni con allargamento di sezione (Papardo, Annunziata) in cui è stata riportata, per riferimento la sezione del treno, la sagoma di uno dei pozzi di ventilazione (in rosso) e parte del corridoio di collegamento con l'altro fornice ed i passaggi interni della stazione.

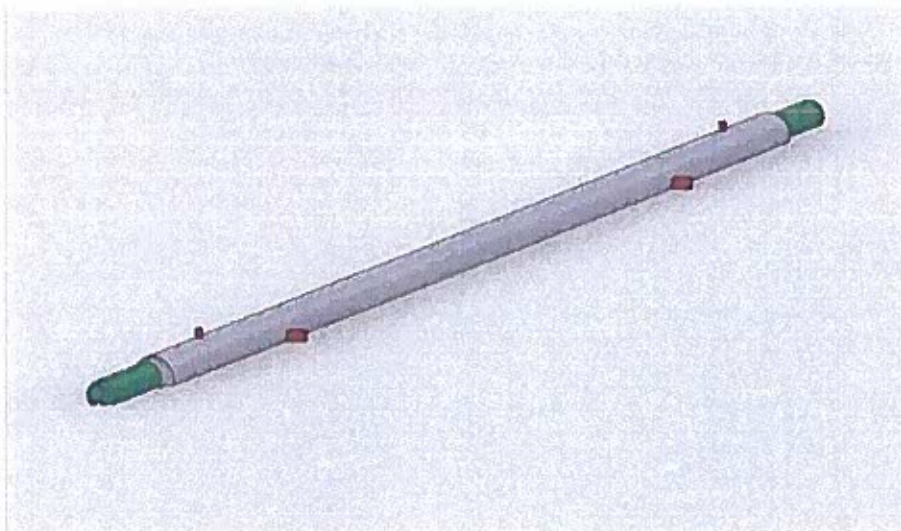


Figura 26: Vista prospettica delle stazioni con allargamento di sezione (Papardo, Annunziata); in rosso sono rappresentati i pozzi di ventilazione e parte dei corridoi di collegamento con l'altro fornice ed i passaggi interni della stazione.

Risultati

Nelle figure 27-32 vengono presentate le velocità su vari piani rappresentativi, sia per la stazione Europa che non presenta un allargamento di sezione, sia per le stazioni Papardo e Annunziata in cui la sezione del fornice è aumentata; in tutti i casi le simulazioni numeriche sono state effettuate per i casi più critici rappresentati dal passaggio del treno alla massima velocità consentita.

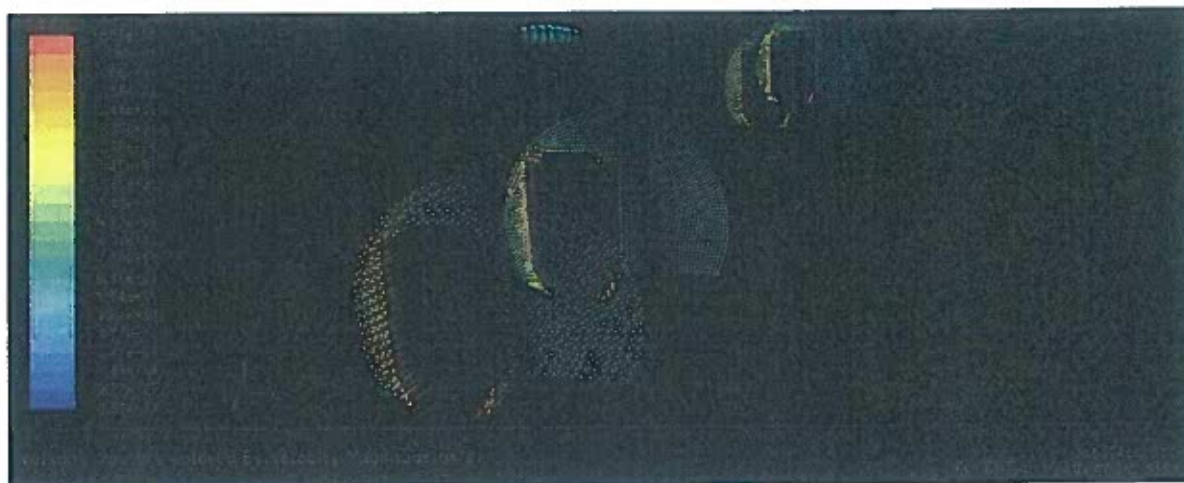


Figura 27: Vista prospettica dei vettori velocità su piani verticali nella stazione senza allargamento di sezione (Europa) durante il passaggio del treno alla velocità di 90 Km/h.

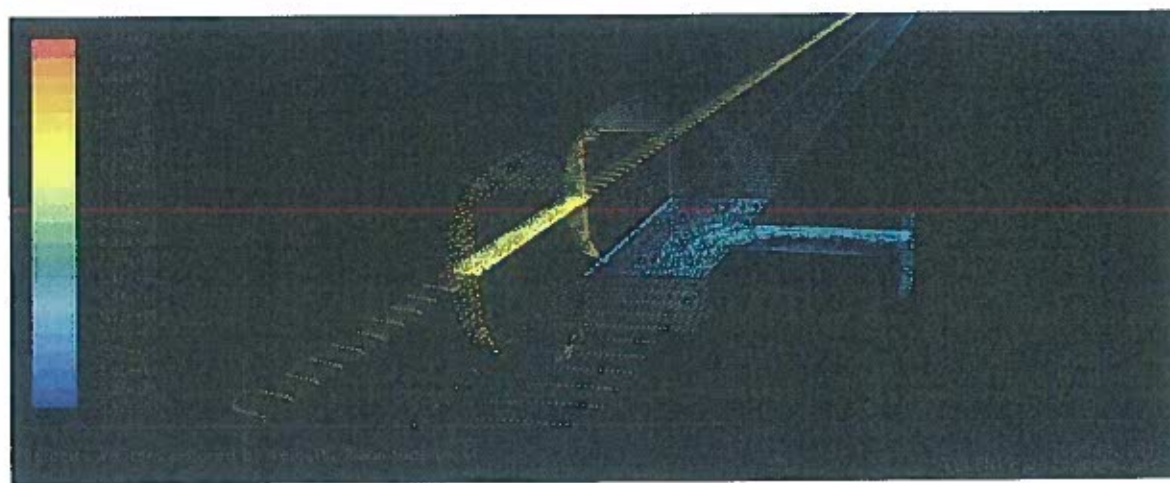


Figura 28: Vista prospettica dei vettori velocità su piani orizzontali e verticali nella stazione senza allargamento di sezione (Europa) durante il passaggio del treno alla velocità di 90 Km/h.

I risultati ottenuti si possono riassumere affermando che il passaggio del treno, transitando in prossimità della banchina ad una velocità notevolmente superiore rispetto a quella indotta, per i fenomeni di comprimibilità, in tutto il resto del tunnel tende a generare un moto retrogrado di

intensità compresa tra il 20% ed il 35% della velocità del treno. Per le velocità dei treni imposte in questo studio (90 Km/h per la stazione senza sezione allargata e 160 Km/h per quelle con sezione allargata) e le sezioni dei fornici le velocità medie delle correnti indotte in banchina non superano i 10 m/s, valori tollerabili per il comfort e la sicurezza di eventuali persone in attesa nella stazione. Bisogna notare che l'intensità della corrente indotta sulla banchina al momento del passaggio del treno dipende linearmente dalla velocità del treno stesso mentre, detta S la sezione del fornice ed s quella frontale del treno, è inversamente proporzionale al fattore $(S/s-1)$. E' stato osservato che i dettagli costruttivi del tunnel, come pozzi di aerazione o passaggi di collegamento hanno grande influenza sulla dinamica comprimibile affrontata nella prima parte ma sono scarsamente efficaci sulla dinamica tridimensionale nel momento del passaggio del treno.

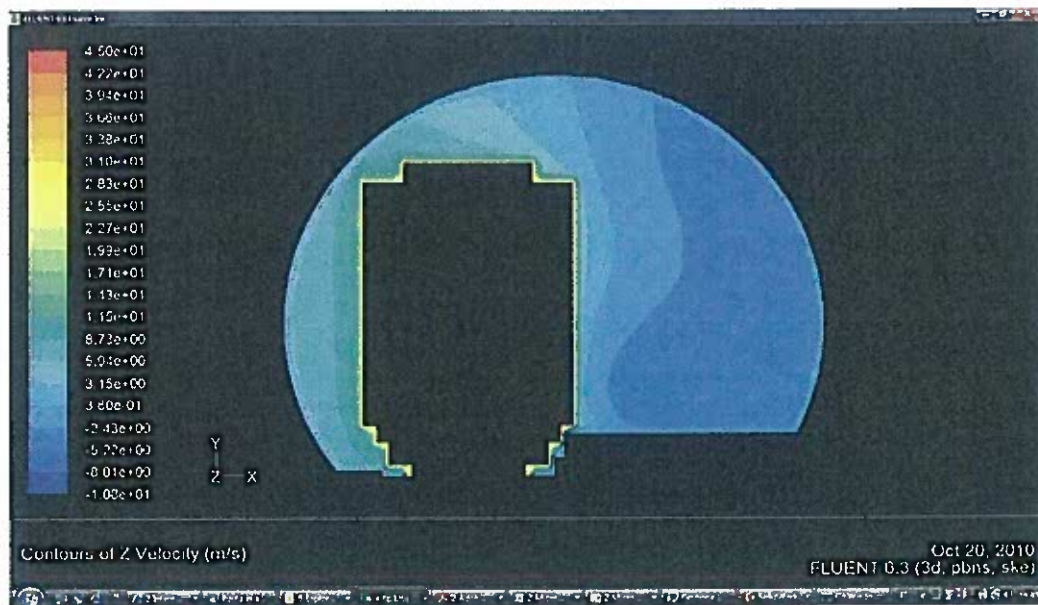


Figura 29: Vista in sezione della velocità longitudinale su una sezione della stazione senza allargamento di sezione (Europa) durante il passaggio del treno alla velocità di 90 Km/h.

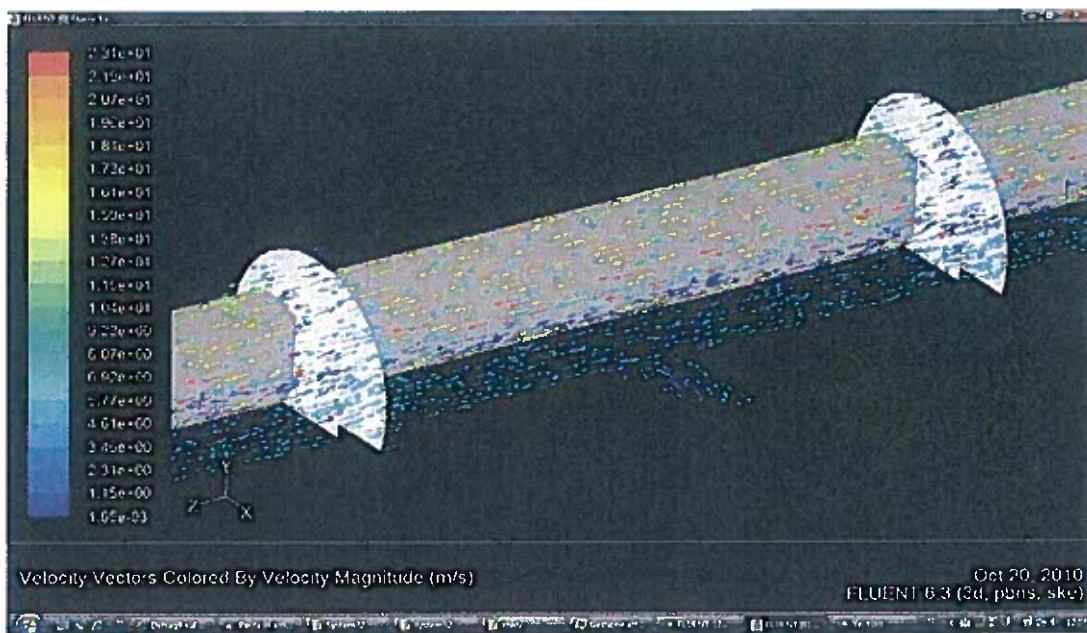


Figura 30: Vista prospettica dei vettori velocità nelle stazioni con allargamento di sezione (Papardo e Annunziata) durante il passaggio del treno alla velocità di 160 Km/h.

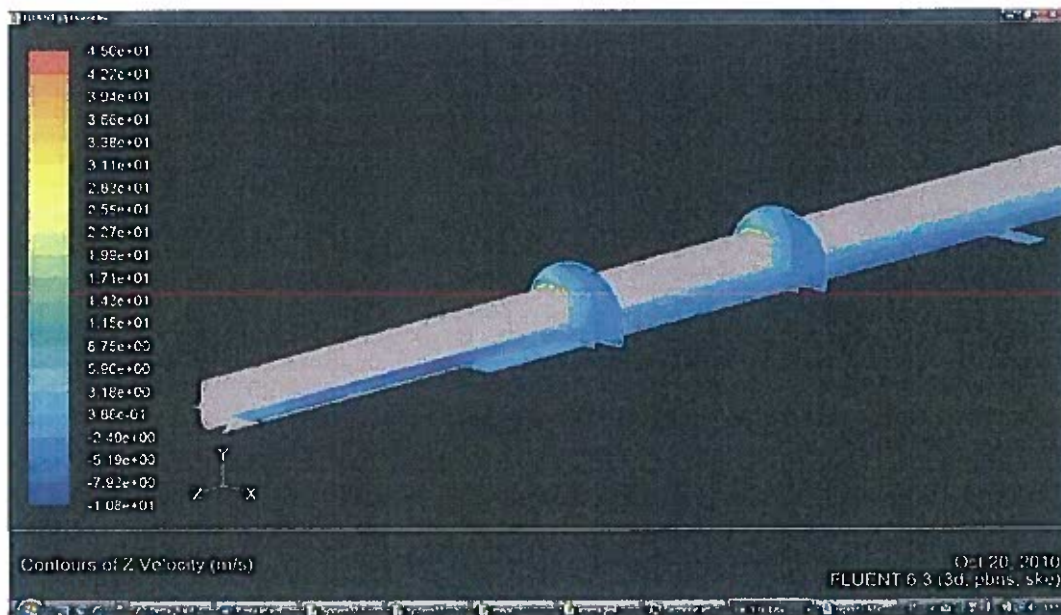


Figura 31: Vista prospettica della velocità longitudinale su piani orizzontali e verticali nelle stazioni con allargamento di sezione (Papardo e Annunziata) durante il passaggio del treno alla velocità di 160 Km/h.

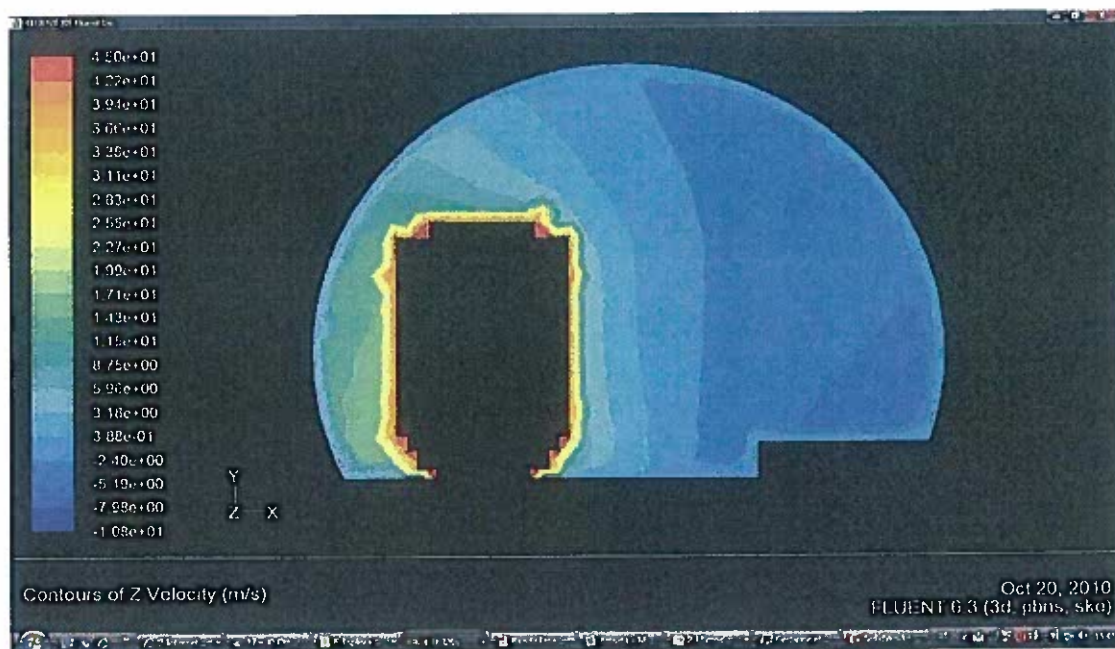


Figura 32: Vista in sezione della velocità longitudinale su una sezione delle stazioni con allargamento di sezione (Papardo e Annunziata) durante il passaggio del treno alla velocità di 160 Km/h.

Prima di concludere la descrizione dei risultati si vogliono mostrare brevemente i grafici delle figure 33 e 34 che mostrano il modulo della velocità del vento, così come avvertita da una persona in attesa sulla banchina della stazione durante il passaggio di un treno. Per questi risultati è stato utilizzato il modello tridimensionale di dinamica non stazionaria (con modellistica della turbolenza LES). Dai grafici si può osservare che l'intensità della corrente cresce durante il passaggio del treno e rapidamente diminuisce dopo il transito del convoglio, in entrambi i casi le velocità hanno valori di circa 10 m/s ed i valori sono consistenti con quanto già osservato per il modello di treno "corto". L'informazione aggiuntiva che si ricava da queste simulazioni è che nonostante la non stazionarietà del fenomeno e le fluttuazioni indotte dalla turbolenza la velocità del vento prodotto non presenta picchi di intensità molto superiore alla media.

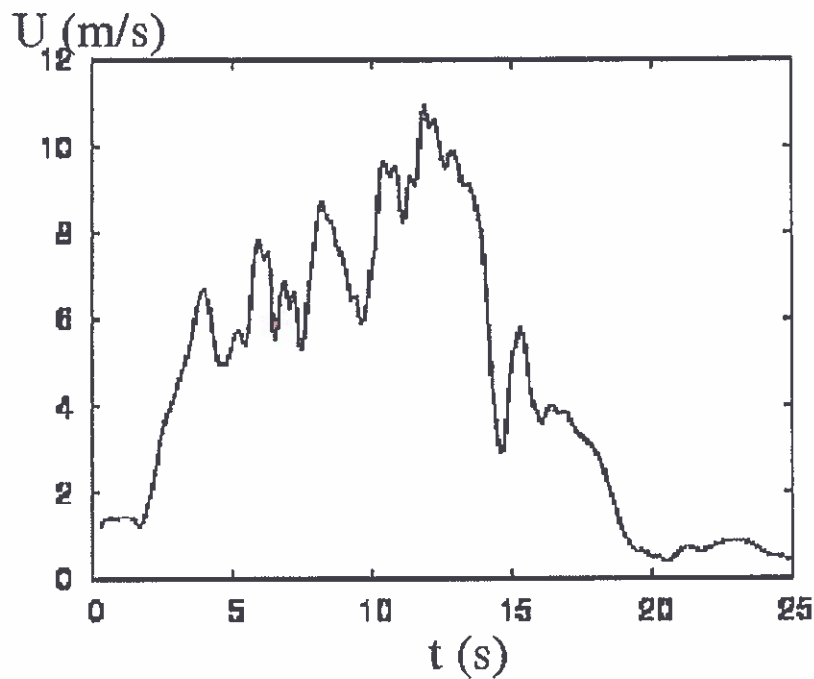


Figura 33: Variazione nel tempo del modulo della velocità campionata in un punto sulla banchina della stazione (all'altezza di 1.8m dal piano calpestabile della banchina ed a 2 m di distanza dal bordo della stessa) senza allargamento di sezione (Europa) durante il passaggio di un treno alla velocità di 90 Km/h.

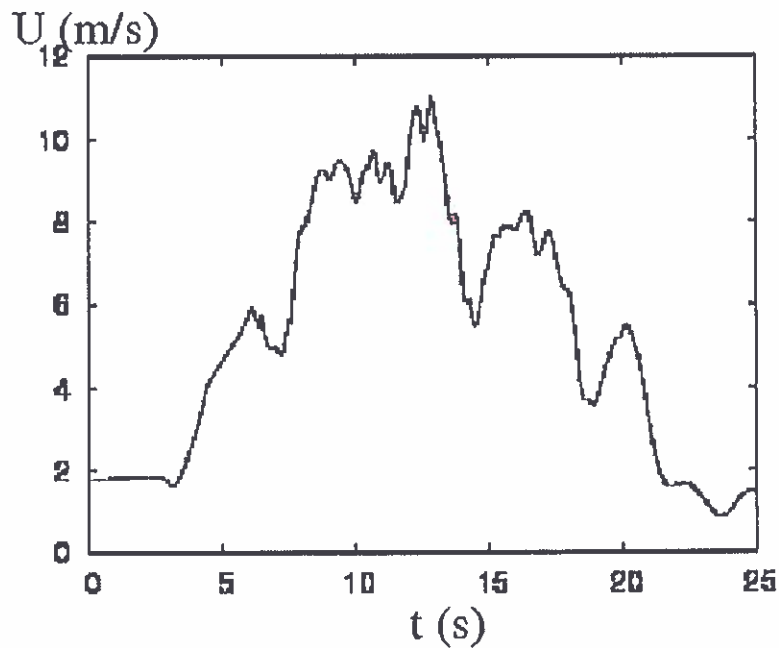


Figura 34: Variazione nel tempo del modulo della velocità campionata in un punto sulla banchina delle stazioni (all'altezza di 1.8m dal piano calpestabile della banchina ed a 2 m di distanza dal bordo della stessa) con allargamento di sezione (Papardo e Annunziata) durante il passaggio di un treno alla velocità di 160 Km/h.

Conclusioni

Le stime sulle velocità prodotte dai transiti di treni ad "alta velocità" ETR500 e merci all'interno dei tunnel S. Agata e S. Cecilia hanno mostrato che queste rimangono all'interno di valori accettabili per la sicurezza ed il comfort di passeggeri presenti sulle banchine delle stazioni Papardo, Annunziata ed Europa sia per quanto riguarda le correnti indotte dal treno lontano dalla stazione sia nel momento in cui quest'ultimo transita in prossimità della banchina. Le velocità prodotte quando il treno transita in stazione sono direttamente proporzionali alla velocità del convoglio e crescono (poco più che linearmente) al crescere del bloccaggio (cioè del rapporto tra la sezione frontale del treno e quella del fornice). Tali considerazioni possono essere utilizzate, partendo dai dati del presente studio per una stima del fenomeno in condizioni differenti.

I risultati ottenuti in questo studio vanno interpretati con riferimento al comfort dei passeggeri presenti sulla banchina di una stazione sotterranea e per quest'ultimo aspetto vanno considerati due fattori: l'intensità delle correnti indotte sulla banchina e le onde di pressione.

Come riportato in Gentiluomo (2001), riguardo al primo fattore, pur non esistendo uno standard unico ci sono varie raccomandazioni che tuttavia risultano anche notevolmente differenti da nazione a nazione. Le ferrovie tedesche fissano come limite massimo una velocità della corrente pari a 17 m/s. Lo stesso limite viene suggerito anche dalle ferrovie inglesi. In Olanda viene invece suggerita una soglia di 11 m/s.

La raccomandazione dell'ORE (Office de Recherche et Essais de l'Union Internationale des Chemins de Fer) riferendosi a studi degli anni '80, è che il valore massimo consentito sia di 17 m/s in quanto un vento di tale intensità produce una spinta perfettamente sopportabile da una persona di altezza e corporatura media.

Per quanto riguarda il secondo fattore (cioè il potenziale fastidio prodotto da repentine variazioni di pressione) c'è invece una maggiore unità di vedute. In particolare, viene comunemente accettato che le variazioni vanno valutate in un intervallo di 3 secondi in quanto tale è il tempo necessario alla reazione fisiologica di un individuo (con particolare riguardo all'adattamento alla pressione dell'orecchio). In questo intervallo temporale la variazione di pressione non deve superare i 3 KPa, per cui i due dati possono essere riassunti affermando che il comfort delle persone in attesa sulla banchina non viene diminuito se i fenomeni fluidodinamici non producono gradienti temporali di pressione superiori a 1000 Pa/s.

Tenendo conto dei valori di velocità media della corrente prodotta sulle banchine da un treno in transito e della loro dipendenza lineare con la velocità del treno, si riportano alcuni valori stimati nelle varie stazioni per diverse velocità di transito:

Stazione Europa

Velocità del treno	Gradiente di pressione massimo sulla banchina	Velocità in banchina
90 Km/h	630 Pa/s	8.0 m/s
110 Km/h	941 Pa/s	9.8 m/s
130 Km/h	1315 Pa/s	11.5 m/s

Stazioni Papardo e Annunziata

Velocità del treno	Gradiente di pressione massimo sulla banchina	Velocità in banchina
160 Km/h	470 Pa/s	10.0 m/s
180 Km/h	600 Pa/s	11.3 m/s
200 Km/h	750 Pa/s	12.5 m/s

E' bene notare che, nell'utilizzare queste velocità per eventuali considerazioni progettuali o di esercizio dei treni, i risultati riportati nelle tabelle si riferiscono alle velocità medie. Come mostrato nelle figure 33 e 34 queste velocità in realtà sono modulate nel tempo da delle fluttuazioni turbolente che, per il problema in esame, possono essere dell'ordine del 20-25% (in più o in meno) della velocità media.

Infine è utile rammentare che mentre la velocità del vento in banchina cresce solo linearmente con la velocità del treno in transito, l'intensità delle onde di pressione aumenta con il quadrato di tale velocità (a causa dell'equazione di Bernoulli) e ciò deve essere tenuto in conto quando si verifica la praticabilità di una scelta progettuale rispetto ai limiti di pressione. In particolare, nelle tabelle precedenti viene anche riportato il massimo valore stimato del gradiente di pressione in banchina e come esso cresce all'aumentare delle velocità di transito del treno nel tunnel. E' evidente come per le velocità consigliate di 160 Km/h e 120 Km/h, rispettivamente per i treni AV e merci nelle stazioni con sezioni allargate, e 90 Km/h e 60 Km/h per le stazioni con sezione corrente i valori del gradiente di pressione siano al di sotto del limite 1KPa/s. Al contrario, specialmente nella stazione Europa, al crescere della velocità del treno il gradiente di pressione si avvicina e supera il suo limite; già per una velocità di 110 Km/h si registra un valore di 941 Pa/s che verosimilmente, considerando le fluttuazioni turbolente, supererà occasionalmente il limite.

Bibliografia

- L. Cantone, E. Crescentini, P. Salvini, V. Vullo & R. Verzicco, "Sviluppo e validazione di un modello fluidodinamico per la simulazione della condotta generale di un convoglio ferroviario," *Ingegneria Ferroviaria*, 1 (2007), pp. 1-12.
- L. Cantone, E. Crescentini, P. Salvini, V. Vullo & R. Verzicco, "Modello numerico per lo studio di una manovra di sfrenatura", *Ingegneria Ferroviaria*, 7-8 (2007), pp. 1-15.
- M. T. Flaminia, G. Milicotti & P. Scarano, "Fenomeni aerodinamici indotti dal transito in galleria dei treni AV", *Ingegneria Ferroviaria*, 10 (2006), pp. 761-779.
- M. J. Melis, I. De Matias, J. M. Alonso, J. L. Navarro & J. L. Tasis, "Tuneles para trenes de alta velocidad. Friccion y ondas producidas por el tren diametro necesario" http://www.tuneleros.com/prote/aerodinamica_tuneles_alta_velocidad.htm (2001).
- R. S. Raghunathan, H.-D. Kim & T. Setoguchi, "Aerodynamica of high-speed railway train", *Progress in Aerospace Sciences*, 38 (2002), pp. 469-514.
- J. A. Shetz, "Aerodynamics of high-speed trains", *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 33 (2001),

pp. 371-414.

Gentiluomo, Pranno & Ventura, "Raddoppio Fiumetorto-Cefalù-Castelbuono fermata di Cefalù.
Studio degli effetti termodinamici al passaggio dei treni"
Rapporto ITALFERR, 2001