

SNCF
SGRDD-Bibliothèque
45, rue de Londres
75379 PARIS CEDEX 08
(PARIS SAINT-LAZARE)
Tél : 01 53 42 90 11

REFERENCE

FER052825

CAHIER

187

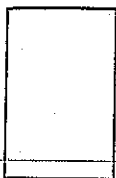
1694

Ingegneria ferroviaria

vol. LX, n° 9, septembre 2005, pp. 741-755, bibliogr., fig., tabl., cart. - (REVUE) - S/C : 0306

Le modèle tram-train. Au delà de l'expérimentation.

HS



Il modello tram-treno: oltre la sperimentazione

Dott. Andrea ALESSANDRI^(*)

Il recente completamento della prima fase del progetto Regiotram-Nordhessen a Kassel segna una simbolica svolta nella non più breve storia del modello tram-treno: l'azione progettuale sulla rete, forte sia dal punto di vista tecnico che di comunicazione, e la presenza dei veicoli RegioCitadis di Alstom, specifici ma nati nell'ottica di un sistema-prodotto, conferiscono all'ultima realizzazione tedesca il carattere di modello di applicazione modulabile anche su diverse realtà. Dopo gli *unicum* di Karlsruhe e Saarbrücken, il modello tram-treno sembra oggi possedere le premesse per una diffusa applicazione, forte di esperienze definibili di seconda generazione come quella di Kassel o, a breve, di Alicante, Aulnay-Bondy e Mulhouse; le informazioni derivate dall'esercizio delle prime reti, unite al risultato delle diverse analisi effettuate negli ultimi anni, permettono di fare il punto della situazione, evidenziando prerogative e limiti di questa interessante soluzione trasportistica ai problemi di rottura di carico.

Genesi e caratteri del modello tram-treno

Parlare di tram-treno significa riferirsi al funzionamento del famoso sistema di trasporto pubblico regionale integrato, creato attorno alla città tedesca di Karlsruhe; situata nel cuore del Land del Baden - Wurtemberg, lungo il corso del Reno, la città di Karlsruhe ha una popolazione di circa 280.000, una superficie di 173 km² ed esercita funzione nodale in una regione ricca di 400.000 abitanti. Questa quota di popolazione è divisa in numerosi centri di piccole e medie dimensioni, su una superficie di più di 500 km². La disponibilità di un sistema tranviario cittadino e di una fitta rete ferroviaria hanno costituito la base per la progressiva definizione; a partire dagli anni '70, del modello Karlsruhe, basato sull'utilizzo dei veicoli tranviari anche fuori dalla rete convenzionale cittadina, ovvero sulla rete ferroviaria; obiettivo di un tale progetto era l'eliminazione della rottura di carico presente tra rete tranviaria e ferroviaria negli spostamenti tra Karlsruhe ed i centri limitrofi, che aveva negli anni messo in crisi il sistema di trasporti regionale. L'indubbio successo del mo-

dello Karlsruhe, sia dal punto di vista della risoluzione degli evidenti ostacoli tecnici e normativi sia da quello della sempre crescente quota di passeggeri trasportati, ne giustifica l'analisi ai fini di altre possibili applicazioni [1].

Al di là dell'esperienza di Karlsruhe, un servizio di tipo tram-treno si distingue nel prevedere la marcia promiscua di veicoli di derivazione tranviaria su tratte ferroviarie aperte anche al traffico pesante [2]. Fattore peculiare è la condivisione del binario, cioè l'esercizio continuo dei veicoli tranviari sulla rete ferroviaria assieme a materiale rotabile pesante, in presenza sia del solo trasporto merci sia di servizi passeggeri. L'utilizzo di veicoli tranviari permette di disegnare percorsi che sfruttino sia la linea ferroviaria extraurbana che la rete tranviaria cittadina, effettuando un servizio su scala regionale, ma in grado di penetrare nel tessuto urbano dei diversi centri attraversati; ciò permette di ottenere, anche su servizi a media percorrenza, una buona prossimità ai bacini di origine e destinazione mantenendo una velocità commerciale molto alta. Le dimensioni ridotte dei veicoli tranviari, la rapidità di accesso in vettura e le ottime prestazioni di accelerazione permettono, infatti, di realizzare gli stessi collegamenti svolti precedentemente con treni regionali effettuando molte più fermate senza penalizzare i tempi globali di percorrenza. Un rotabile tranviario può essere adattato abbastanza facilmente alla marcia con segnalamento a norma ferroviaria, ma rimane abilitato anche alla guida a vista, mantenendo allo stesso tempo costi di esercizio molto più bassi rispetto ad un veicolo ferroviario per servizio regionale.

La presenza, oggi, di differenti esempi di tram-treno rende possibile effettuare una chiara distinzione tra reti con effettiva condivisione di binario e sistemi che, pur avvicinando il mondo tranviario e quello ferroviario, non operano una completa integrazione. Come già descritto, fattore distintivo del tram-treno è l'utilizzo di tratte ferroviarie in maniera non esclusiva, ovvero il loro mantenimento in stato di completa operatività per il traffico pesante in termini funzionali e temporali; tale condizione, sicuramente complessa e costosa, offre il vantaggio di mantenere la rete su ferro flessibile a qualsiasi utilizzo presente e futuro, ottenendo quindi maggiore flessibilità e migliore sfruttamento dell'infrastruttura.

Un primo esempio di realizzazione di sistema tram-treno è quello di Saarbrücken dove, a partire dal 1992,

^(*) Neolaureato in disegno industriale.

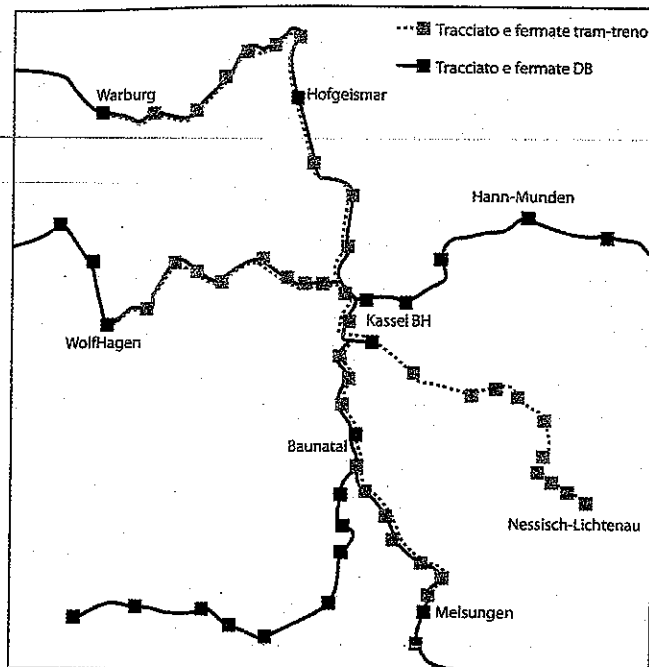


Fig. 1 - La rete del Regiotram di Kassel.

viene realizzata una nuova linea tranviaria sul modello di quella di Karlsruhe: la Stadtbahn è oggi lunga 42 km, parte da Sarreguemines, utilizza un tratto di linea DB fino alla stazione di Saarbrücken quindi prosegue nel centro cittadino in sede in gran parte riservata, attraversa Regelsberg per poi confluire di nuovo sulla rete DB fino a Lebach: la velocità media sull'intero percorso è di 34,5 km/h con frequenze da 5 a 15 minuti. In maniera simile nel 1995 la Kasseler Verkehrs GmbH inaugura il prolungamento della preesistente linea urbana 5 da Kassel a Baunatal, una cittadina di 25000 abitanti, utilizzando il tracciato della linea privata di trasporto merci KNE (fig. 1). Tra il 1999 ed il 2002 vengono aperte anche le tratte verso Lossetal, su linea DB, e Wolfhagen, sempre su linea merci non elettrificata: anche Kassel sperimenta quindi con successo la condivisione di binario sia con servizi passeggeri che merci. Anche nella cintura parigina è in corso di realizzazione un sistema di tipo tram-treno tra Aulnay-sous-Bois e Bondyentre, destinato a collegare due rami paralleli della RER. Il tracciato utilizzerà un raccordo ferroviario di 8 km realizzato nel 1875, che sarà raddoppiato e dotato di nuovo armamento; la RATP, in collaborazione con la SNCF, ha già ordinato una prima serie dei convogli Avanto di Siemens e prevede la realizzazione di molti altri collegamenti regionali tramite condivisione di binario (fig. 2).

La Red Line realizzata nel 1981 a San Diego, uno dei primi esempi di LRV negli Stati Uniti, si caratterizza per la condivisione di binario tra servizi merci e tram: non è però corretto in questo caso parlare di sistema tram-treno in quanto la linea viene occupata dalle due differenti tipologie di servizio in fasce orarie distinte. Così come ipotiz-

zato recentemente anche per Palermo, i tram utilizzano infatti la rete solo durante il giorno mentre i servizi merci vengono effettuati di notte, in una configurazione meglio definibile come *time-sharing*.

Non possono infine essere classificate come sistemi tram-treno reti quali il Metrolink di Manchester: in questo caso, infatti, la sede ferroviaria è stata adattata e trasformata per il solo utilizzo tranviario. La presenza di sedime ferroviario comporta in entrambi i casi l'adozione di alcune soluzioni tecniche, come il profilo del cerchione, analoghe al sistema di Karlsruhe, ma l'assenza di condivisione di binario ne giustifica una classificazione come sistemi LRV classici.

L'applicazione di un modello tram-treno prevede quindi l'utilizzo combinato di rete ferroviaria e tranviaria, senza alcun limite alla circolazione promiscua di convogli

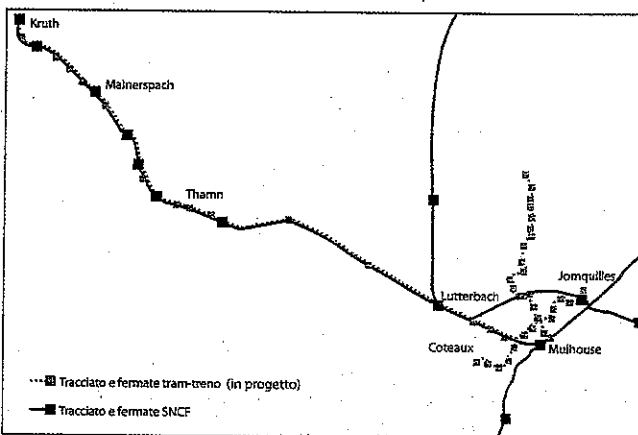


Fig. 2 - Un altro esempio di rete tram-treno: Mulhouse.

tranviari e ferroviari: all'origine della scelta risiede la necessità di utilizzare infrastrutture ferroviarie già disponibili al fine di abbattere i costi⁽¹⁾, le quali devono però possedere una buona capacità residua ed un tracciato interessante ai fini di un servizio passeggeri. Obiettivo principale della realizzazione di una linea tram-treno è infatti affiancare o sostituire integralmente una linea ferroviaria regionale interessata da servizi passeggeri non competitivi: la crisi del trasporto ferroviario che ha interessato l'Europa negli ultimi vent'anni ha investito in primo luogo proprio i servizi regionali, non più capaci di offrire dinamiche di spostamento concorrenziali⁽²⁾. Altra via ver-

⁽¹⁾ La Germania è infatti un paese storicamente ricco sia di linee tranviarie in esercizio sia di linee ferroviarie, molte delle quali sottoutilizzate o addirittura chiuse al traffico; in questo contesto appare logico sfruttare entrambe le risorse disponibili al fine di implementare un nuovo servizio con investimenti ridotti.

⁽²⁾ In Italia è possibile ricordare la linea Mantova-Peschiera: nuove corse veloci di collegamento tra i nodi principali potrebbero essere affiancati servizi effettuati con materiale tranviario, permettendo di deviare i tracciati all'interno dei centri abitati e di contenere molto i costi di gestione dell'intero sistema.

so la loro rivitalizzazione potrebbe essere costituita da una trasformazione in chiave suburbana, sul modello delle S-Bahn ad esempio: rispetto a ciò il modello tram-treno garantisce, a fronte di una minore capacità, molta flessibilità e costi ridotti. Utilizzare tracciati tranviari rende infatti possibile attraversare il tessuto abitato senza bisogno di protezione della sede e realizzare fermate costituite da semplici marciapiedi; il minor ingombro della sede tranviaria ed i ridotti raggi di curvatura rendono inoltre molto più semplice e libero il disegno del tracciato, rendendo più facile intercettare le zone a più alta domanda; anche i costi di impianto e gestione della linea così come rumore e vibrazioni generati sono sensibilmente minori. La scelta di un sistema di tipo tram-treno può quindi essere più che opportuna, a patto che la domanda stimata non richieda l'installazione di sistemi più capaci; per questo motivo il tram-treno si propone come modo di trasporto ideale per linee a carattere regionale attraverso un territorio che in architettura viene definito città diffusa, costituito da insediamenti dispersi ed a media densità abitativa.

servizio promiscuo, oggi facilitata dal confronto dell'insieme di accorgimenti già adottati nelle differenti realizzazioni con i dati ottenuti dall'esercizio: pur in presenza di differenti regolamentazioni sul territorio europeo, è forse infatti possibile delineare uno standard di sistema veicolo per applicazioni tram-treno:

Il primo problema da affrontare nella verifica della fattibilità di un veicolo per uso promiscuo riguarda la realizzazione di un corretto interfacciamento di un unico profilo sia con i binari di tipo ferroviario che con quelli tranviari; nel caso in cui la rete tranviaria sia già esistente la prima e fondamentale condizione discriminante è sicuramente la presenza dello stesso scartamento sulle due reti: a Milano, ad esempio, i soli 10 mm di differenza nei confronti dello standard ferroviario rendono impossibile la creazione di un profilo ruota per uso promiscuo [3].

Questo problema, seppur vincolante, è minoritario nella media dei possibili scenari per il tram-treno causa lo scarso numero di reti tranviarie oggi attive in Europa; ri-

TABELLA 1

PRINCIPALI MISURE DELLE ROTAIE TIPO PHOENIX IN USO IN EUROPA - DOVE NON INDICATO, MISURE IN MM

Tipo	A prof. g.	B largh. g.	C raggio f.	D largh. f.	E largh. g.	peso (Kg/m)	F altezza	G largh. s.	Paesi
Ri 59	47	42	10	56	12	58,96	180	180	D,PI
Ri 59N	47	42	13	56	12	58,20	180	180	D,PI
Ri 60	47	36	10	56	12	60,48	180	180	F,D,PI
Ri 60N	47	36	13	56	12	59,74	180	180	S,D,PI
Ph 37a	47	60	14	60	13	66,80	180	180	D
NP4aM	41	34,5	10	56	12	62,37	180	180	B
NP4aS	41	35,3	13	55,2	12	61,91	180	180	B
35 GP	45,9	36	10	56,2	13	54,78	152,5	141,5	F
41 GP	45,9	41	10	56,2	13	55,34	152,5	141,5	F,Ch
UNI Ir2 ⁽³⁾	47	36	13	56	12	59,74	180	180	I
UNI Ir3 ⁽⁴⁾	41	34,5	10	56	12	62,37	180	180	I

La configurazione del materiale rotabile

Se da un lato il modello tram-treno costituisce una interessante opportunità per alcuni scenari di mobilità regionale, l'effettiva realizzazione della rete costituisce un processo ogni volta nuovo ed unico a causa della presenza di numerosi attori istituzionali ed economici, nonché di differenti configurazioni del territorio. Riguarda invece ogni contesto europeo la soluzione delle diverse problematiche, di carattere tecnico e normativo, derivanti dall'e-

mane invece problematico e complesso il disegno di un profilo di ruota capace di effettuare un'interfaccia corretta in ogni parte delle due vie di corsa, garantendo compatibilità geometrica, resistenza meccanica e rispondenza alle norme.

Un veicolo per servizio tram-treno si troverà infatti a viaggiare sia su armamento ferroviario ordinario, anche se di tipo leggero, sia su armamento tranviario di tipo Phoenix (tab. 1); pur ipotizzando la presenza di una sede in gran parte riservata, l'attraversamento di aree urbane o suburbane rende infatti necessario l'utilizzo di rotaie a gola tranviarie. Il profilo ruota per tram-treno deve essere compatibile con le diverse geometrie di fungo dei profili tipo Vignole e tipo Phoenix, ma anche con le differenti strutture presenti ai deviatori:

- cuore ferroviario: il transito sul deviatore prevede che

⁽³⁾ La rotaia tipo Ir2, descritta nella norma UNI 3142:1996, deriva dal tipo Ri 60N.

⁽⁴⁾ La rotaia tipo Ir3, descritta nella norma UNI 3142:1996, deriva dal tipo NP4aM.

la ruota posizionata sul binario che attraversa il cuore perda per tutta l'estensione dello spazio nocivo ogni contatto con la rotaia. Questa dinamica provoca una caduta ed un urto tra ruota e punta del cuore, che obbligano al mantenimento di velocità ridotte; la guida del carrello è invece temporaneamente affidata alla ruota opposta grazie alla presenza di una controrotaia estesa per tutta la lunghezza del cuore, la quale agisce direttamente sulla faccia interna del bordino⁽⁵⁾. Il deviatore ferroviario richiede, causa le sollecitazioni rilevanti, organi di rotolamento con buone caratteristiche meccaniche ed una distanza di 1360 mm tra le facce interne delle ruote per un corretto ingresso nelle controrotaie;

- cuore tranviario: la presenza di ruote dalle minori caratteristiche meccaniche e, soprattutto, il rumore generato dalla dinamica ferroviaria di urto nell'attraversamento del cuore, hanno condotto all'ideazione di una struttura con caratteristiche totalmente diverse: in corrispondenza dello spazio nocivo il profilo della gola diventa progressivamente meno profondo, fino ad intercettare la base del bordino, fungendo da temporaneo piano di rotolamento; in questo modo lo spazio nocivo viene attraversato appoggiando direttamente sul bordino, evitando lo scontro in corrispondenza della punta.

Un deviatore tranviario necessita di un bordino piatto e di larghezza ridotta, in base alle diverse normative nazionali; in Italia il profilo II⁽⁶⁾ può accogliere bordini con base larga fino a 24 mm circa. Il profilo del bordino di un veicolo promiscuo deve quindi presentare una base piatta, un'altezza ed uno spessore compatibili sia con le gole tranviarie che con i requisiti dei regolamenti ferroviari; uno spessore di bordino troppo ridotto potrebbe anche dare luogo, nel transito sui deviatori ferroviari, a dinami-

che irregolari di urto con la controrotaia con conseguente svio della sala. Sempre riguardo al profilo della ruota, va anche tenuto in conto l'allargamento dello scartamento in curva presente sulla rete ferroviaria: questo accorgimento è volto soprattutto al contenimento della resistenza al moto derivante dal contatto tra bordino e rotaia in curva (tab. 2). In relazione alla circolazione di veicoli tranviari, con interesse ridotto, tale allargamento obbliga l'adozione di ruote che presentino una superficie di rotolamento adeguatamente ampia da compensare la variazione di scartamento.

Le soluzioni adottate

La circolazione dei veicoli bitensione di Karlsruhe è una prova di come tutti questi problemi possano essere risolti con successo qualora sussistano alcune condizioni di base. La rete della KVG, come altre in Germania, presenta scartamento standard ed armamento costituito da rotaie R1 59N per i tratti in rettilineo e Ph 37A in curva, dotate di raggio di raccordo del fungo di 13 mm, lo stesso delle rotaie UIC 60, e capaci di ospitare bordini di dimensioni a norma ferroviaria. Per conciliare le esigenze di circolazione in sede promiscua e transito nei deviatori, il profilo è stato modificato⁽⁷⁾ nel seguente modo (fig. 3): il cerchione ha una larghezza di 135 mm, contro i 100 mm usati in Germania e gli 84 mm previsti in Italia, e prevede un rientro di 8 mm sulla faccia interna, al fine di permettere al bordino di entrare nelle controrotaie ferroviarie senza urtarle. L'azione di guida viene trasferita dal bordino,

TABELLA 2

ALLARGAMENTO DELLO SCARTAMENTO SULLA RETE RFI

Raggio della curva		Scartamento
da metri	a metri	mm
+∞	275	1435
275	250	1440
250	225	1445
225	200	1450
200	175	1455
175	150	1460
150	0	1465

⁽⁵⁾ Per permettere il transito a velocità maggiori senza eccessive sollecitazioni alla struttura della ruota ed alla rotaia, le nuove linee ad alta intensità di traffico presentano apparecchi dotati di cuore mobile, la cui geometria permette la realizzazione di continuità di binario.

⁽⁶⁾ UNI 3142, Rotaie a gola di acciaio per linee tranviarie, Ente nazionale italiano di unificazione, Milano, 1996.

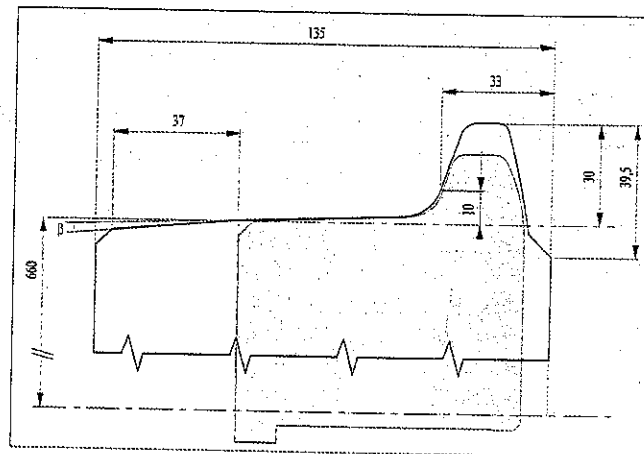


Fig. 3 - Il profilo del cerchione adottato a Karlsruhe sulle motrici GT 8-100 C/2S a confronto con il cerchione illustrato nella norma UNI 3332 - quote in mm.

⁽⁷⁾ Il profilo ruota di un veicolo tranviario non risponde a vincoli normativi; in Italia la norma quadro UNIFER indica la possibile adozione di profili diversi da quelli indicati nella UNI 3332, se necessario.

TABELLA 3

TABELLA RIASSUNTIVA DELLE DIMENSIONI PRINCIPALI DEI PROFILI ADOTTATI DALLA KVG E DALLA SNCF

	Kvg Karlsruhe	SNCF
altezza del bordino	31 mm	31
larghezza della ruota	135 mm	135
diametro della ruota (a nuovo)	660 mm	630
Qr minimo (a nuovo)	6,5	6,5
distanza tra le facce interne delle ruote	1361 mm	1360
distanza tra le facce interne dei bordini	1380 mm	1380

mantenuto sottile al fine di entrare nelle gole tranviarie, alla faccia interna della ruota, che va ad interfacciarsi con controrotaie rialzate rispetto al piano del ferro [4]. L'area esterna del piano di rotolamento del cerchione è infine inclinata con tangente di 1/10 per una lunghezza di 37 mm in maniera tale da non interferire, causa la maggiore larghezza, con il manto stradale presente sulla sede promiscua.

Nel caso di Saarbrücken la realizzazione del servizio tram-treno coincideva invece con la realizzazione di una rete tranviaria nuova, da configurare in assoluta libertà; le autorità cittadine hanno quindi optato per la realizzazione di un armamento a carattere ferroviario leggero. La rete utilizza rotaie a gola profonda di tipo Ph 37 A, il raggio minimo di curvatura è di 30 metri, la sede è rialzata di 80 mm sul piano stradale e viene usata in modo promiscuo solo occasionalmente da mezzi di emergenza o, in alcuni tratti, per l'accesso a proprietà limitrofe, mentre gli incroci sono a raso con preferenziamento semaforico. Il profilo del cerchione adottato è di tipo tipicamente ferroviario, con il bordino modificato solamente alla base per permettere il transito sul cuore tranviario; questa scelta deriva dall'osservazione di un'usura particolarmente precoce delle ruote in uso a Karlsruhe, proprio a causa dell'esiguità del bordino. L'esempio di Saarbrücken dimostra come nel caso di nuova realizzazione della rete tranviaria, ovvero nello scenario oggi più plausibile in Europa, sia possibile adottare direttamente profili ruota di tipo ferroviario; questa soluzione obbliga però ad utilizzare in sede tranviaria rotaie con gola larga 60 mm, impedendo per ragioni di sicurezza il transito di biciclette nella sede. Il problema diviene quindi di tipo urbanistico e consiste nella necessità di trovare spazi alternativi per il traffico ciclistico, al fine di non rendere il tram ostacolo materiale all'uso di altri mezzi di trasporto. La Germania, dove le rotaie tranviarie hanno spesso dimensioni di gola rilevanti, offre buoni esempi di integrazione, con piste ciclabili diffuse e separate anche dai percorsi pedonali, ma tale scenario non è applicabile in tutti i contesti europei; il profilo speciale adottato a Kar-

lsruhe riesce invece nell'intento di creare le condizioni tecniche per il servizio tram-treno mantenendo rotaie ancora compatibili con il transito di biciclette, anche se a costo di minore longevità delle ruote.

Anche lo studio della SNCF per applicazioni tram-treno nella cintura parigina parte da una condizione in cui la rete tranviaria è ancora da realizzare, mentre Kassel ripercorre fedelmente l'esperienza di Karlsruhe; è quindi necessaria l'analisi di ogni singolo caso, processo che può portare a differenti soluzioni o anche risolversi in verdetti negativi. Le città Europee oggi dotate di reti tranviarie storiche sono in ogni caso poche e di dimensioni medio grandi, non rispondenti quindi allo scenario tipo di un servizio tram-treno. Riassumendo, i profili ruota studiati appositamente per un sistema tram-treno sono due, ovvero quello in uso a Karlsruhe e quello elaborato dalle SNCF (tab. 3).

Tali profili derivano dal confronto con la normativa UIC 510-2, riguardante i profili ruota ferroviari, e costituiscono soluzioni percorribili senza problemi. L'altezza del bordino è in entrambi i casi di 31 mm e necessita, prevedendo l'usura delle ruote, di una gola profonda 47 mm: in presenza di un Qr di 6,5 sono necessarie larghezze di gola di 42 mm in curva e 36 mm in rettilineo, ancora compatibili con il transito di biciclette [5]. La larghezza del cerchione è di 135 mm, la minima prevista dalla UIC 510-2 e compatibile con l'allargamento dello scartamento in curva; con l'uso di questi profili la rete urbana può essere armata con rotaie Ri 59N, Ri 60N o con la corrispondente UNI Ir2. In sintesi, l'applicazione di un profilo specifico per il tram-treno garantisce una piena operabilità sulle reti ferroviaria e tranviaria, soprattutto se quest'ultima è di nuova costruzione; in caso contrario è invece necessaria un'analisi specifica. Tale profilo non comporta l'adozione di rotaie con gola particolarmente larga, quindi non compromette la presenza di pedoni e ciclisti sul tracciato, ma rende le ruote soggette a fenomeni di usura precoce. Rimane in ogni caso possibile anche l'adozione di profili ferroviari, con rotaie tranviarie a gola larga, ma solo con la chiusura della sede a cicli e motocicli.

La dinamica di marcia

La scelta della tipologia di rodiggio è importante in quanto determinante nella configurazione di tutta la struttura del veicolo, in particolare per la sua azione di vincolo nel disegno del pianale; allo stesso tempo il rodiggio è il principale responsabile del comportamento dinamico del veicolo, quindi di prestazioni, sicurezza e comfort. Lo scenario di applicazione di un servizio tram-treno prevede tratti caratterizzati da dotazioni infrastrutturali e condizioni di marcia molto differenti:

A. tratti tranviari urbani: la circolazione avviene su armamento per sede promiscua, con rotaie a gola e scambi tranviari. La velocità di marcia è ridotta, rispondente ai

valori tollerati dal codice della strada, i raggi di curvatura possono avere valori di 25, 18 o anche 15 metri ed il regime di marcia è reso irregolare da attraversamenti, intersezioni a raso, fermate frequenti ed eventuale presenza turbativa di traffico privato;

B. tratti tranviari extraurbani o protetti: in questi tratti la protezione della sede, abbinata all'uso di rotaie Vignole, di fermate più distanti e di sistemi di preferenziamiento, permette regimi di marcia più regolari e velocità massime maggiori, nei limiti delle normative;

C. tratti ferroviari interurbani: la sede è di tipo ferroviario, quindi separata e dotata di segnalamento; la marcia avviene per la gran parte del tragitto alla velocità massima consentita dal gestore di rete per la classe di veicoli, fino a valori di 100-110 km/h; il tracciato presenta grandi raggi di curvatura ed armamento di tipo ferroviario. Il transito sugli scambi ed i difetti sulla superficie del fungo, derivati dal transito di materiale pesante, rendono forti le sollecitazioni sugli organi di rotolamento [6].

Rispetto a veicoli tranviari tradizionali, un veicolo tram-treno deve presentare un rodiggio capace di sopportare sollecitazioni più intense, garantendo sempre affidabilità, comfort di marcia ed una buona dinamica nell'ingresso in curva; la natura dei carrelli rimane allo stesso tempo tipicamente tranviaria, causa i ridotti raggi di curvatura, la necessità di pianale ribassato ed i limiti relativi al peso per asse.

L'equipaggiamento elettrico

Una motrice tranviaria è spinta generalmente da motori elettrici trifase controllati da un circuito di trazione alimentati tramite captazione; la tensione in ingresso al pantografo, solitamente di 600 V cc o 750 V cc, passa attraverso un circuito di protezione ed alimenta una sezione ad alta tensione e circuiti ausiliari a media e bassa tensione. Il transito su reti ferroviarie comporta però il confronto con una realtà infrastrutturale differente anche in merito alle scelte riguardanti l'alimentazione.

Mentre per le reti tranviarie urbane la scelta di una trazione elettrica e di un sistema di alimentazione a captazione si è storicamente imposta come l'unica compatibile con lo scenario cittadino e la natura dei veicoli, il sistema ferroviario sfrutta invece diverse soluzioni riguardo a tra-

zione ed alimentazione in base alla natura del servizio. Lo scenario europeo si caratterizza per la presenza, quasi equamente ripartita, di linee ferroviarie elettrificate e non elettrificate (tab. 4); l'elettificazione coincide solitamente con un alto sfruttamento della linea e con il transito di servizi passeggeri a lunga percorrenza, riflettendo scelte di carattere sia tecnico che politico. Un veicolo tranviario progettato per l'uso promiscuo sulla rete ferroviaria europea deve quindi interfacciarsi con:

1. una considerevole porzione della rete, in particolare di quella regionale, priva di linea aerea; in fase di progettazione del servizio può essere valutata l'opportunità economica e la possibilità tecnica di elettrificazione della linea, in tensione tranviaria o secondo standard ferroviario, in base alla natura presente e futura del traffico pesante locale;

2. scelte differenti riguardo a correnti e tensioni di alimentazione tra le diverse nazioni; in Europa sono principalmente in uso sistemi alimentati a 25 kV ca 50 Hz, 15 kV ca 16^{2/3} Hz, 1,5 kV cc, 3kV cc.

In queste condizioni possono essere individuati quattro ipotetici scenari relativi all'alimentazione:

1. la rete urbana ed il tratto ferroviario sono entrambi elettrificati con standard tranviario;

2. il servizio utilizza tratti tranviari elettrificati e linee ferroviarie non elettrificabili;

TABELLA 4

ELETTRIFICAZIONE NELLA RETE FERROVIARIA EUROPEA
(Fonte: Eurostat-2004)

Paese	elettrificata (km)	non elettrificata (km)	totale(km)	linea elett. (%)
Austria	3584	2396	5980	59
Belgio	5023	1147	6170	81
Danimarca	324	2564	2888	11
Finlandia	3769	4936	8705	43
Francia	30059	18890	48949	61
Germania	44309	30669	74978	60
Grecia	82	2303	2385	4
Irlanda	47	1872	1939	2
Italia	16853	5458	22311	75
Norvegia	2519	1660	4179	60
Olanda	n.p.	n.p.	2809	n.p.
Portogallo	905	2673	3578	25
Regno Unito	12162	21952	34114	35
Svezia	8986	2512	11498	78
Svizzera	n.p.	n.p.	7487	n.p.
Totale U.E.	128622	99032	237970	46

3. la rete ferroviaria è già elettrificata ed il veicolo deve interfacciarsi con due diverse tensioni di alimentazione aerea, urbana ed interurbana;

4. la linea utilizza una rete tranviaria e tronchi ferroviari alimentati con diverse tensioni, richiedendo al veicolo capacità di accettare tre o più diverse tipologie di alimentazione.

Il configurarsi di tali scenari dipende sia dalla situazione iniziale del contesto sia da scelte operate in fase di progettazione del servizio; in termini di prodotto ciò implica la necessità di un sistema veicolo capace di rispondere alle diverse combinazioni di requisiti possibili, ovvero già configurato al fine di accogliere differenti dotazioni di equipaggiamento elettrico.

Procedendo nell'analisi delle possibili configurazioni dell'equipaggiamento elettrico (tab. 5), con le relative implicazioni in termini di costi, ingombri e peso, si rende evidente come un nodo fondamentale consista nell'oppor-

nalisi sommaria dello schema di base comune alle realizzazioni bitensione esistenti, ovvero Karlsruhe [7] e Saarbrücken [8], individua:

- *sezione di commutazione*: subito alla base del pantografo il circuito prevede un commutatore per il cambio di tensione, uno scaricatore di sovratensioni e l'interruttore principale ad aria compressa. Il commutatore permette di attivare o meno la sezione di trasformazione, in presenza di tensioni diverse da quella tranviaria; il suo azionamento è automatico e basato su un circuito di riconoscimento della tensione⁽⁸⁾;

- *sezione di trasformazione*: schema e componenti di questa sezione variano in base alla tipologia di corrente ed al valore di tensione in arrivo; nel caso di Saarbrücken, con corrente alternata a 15 kV 16^{2/3} Hz, il circuito si compone di uno stadio di trasformazione, della potenza di 660 kVA e con due secondari in uscita a 400 V e 1050 A massimi, e di due convertitori a quattro quadranti posti in parallelo, con tensione d'uscita a 750 V cc;

- *sezione di trazione ed ausiliaria*: una volta garantita in ogni condizione operativa la presenza di tensione a 600 o 750 V cc, lo schema della parte di azionamenti deputata alla trazione ed all'alimentazione dei circuiti ausiliari riflette quello di un veicolo tranviario comune.

Una soluzione di questo tipo è praticabile e già disponibile sul mercato: la sua applicazione comporta un aumento dei costi del veicolo, 6-7% rispetto ad un veicolo tranviario comune⁽⁹⁾, ed un sensibile incremento del peso totale, pari a circa cinque tonnellate nel caso di Karlsruhe e Saarbrücken; le componenti aggiuntive, in particolare gli apparati di trasformazione, hanno ingombri notevoli e pongono, soprattutto nell'ipotesi di un veicolo trimodale, seri problemi nel mantenimento dei limiti di sagoma.

L'utilizzo di architetture modulari e di componenti comuni all'intero settore tranviario rende l'azionamento politensione, qualora applicabile, una scelta affidabile, efficiente, sostenibile in termini di costi e manutenzione e meglio rispondente alla natura elettrica del veicolo, anche dal punto di vista dell'immagine. Unico vincolo rimane, chiaramente, la presenza di linea aerea su tutto il percorso o di condizioni tecniche, gestionali ed economiche tali da permetterne la realizzazione.

Azionamento ibrido

Un veicolo tranviario ibrido affianca invece alla trazione elettrica, pilotata da apparati di gestione della tensione

⁽⁸⁾ Nelle prime realizzazioni tale passaggio avveniva in presenza di tratti neutri, con linea aerea non alimentata, lunghi anche 80 metri; tale condizione non sembrerebbe necessaria per i nuovi veicoli Alstom in realizzazione.

⁽⁹⁾ Aumento ipotizzato su un ordine di almeno 25 veicoli, da [5].

TABELLA 5

POSSIBILI CONFIGURAZIONI DI IMPIANTO

Scenario	Equipaggiamento
1	600/750 V cc
1, 2, 3, 4	generatore interno
3	600/750 V cc + 15 kV ca 16 ^{2/3} Hz
3	600/750 V cc + 25 kV ca 50 Hz
3	600/750 V cc + 1500 V cc
3	600/750 V cc + 3000 V cc
2, 3, 4	600/750 V cc + generatore interno
4	600/750 V cc + 15 kV + 25 kV

tunità di mantenere il sistema veicolo operante per sola captazione o di ricorrere a sistemi di generazione interna di energia.

Azionamenti politensione

Un convoglio tranviario è per definizione un veicolo elettrico; tale soluzione tecnologica ne garantisce le doti di silenziosità ed efficienza energetica nonché le buone prestazioni ed il valore nullo di inquinamento atmosferico in loco: risulta quindi naturale trovare nell'adeguamento degli azionamenti la soluzione alla circolazione sotto diverse tensioni di linea. L'intervento nell'architettura di sistema si traduce nella realizzazione di un apparato capace di convertire la tensione ferroviaria in quella tranviaria; il sistema veicolo si presenta infatti come derivato da collaudati modelli tranviari urbani, disegnati per operare in corrente continua a 600 V o 750 V. Un'a-

e di frenatura, un impianto di generazione composto, oggi, da un motore Diesel con relative componenti di supporto, da un alternatore e da un raddrizzatore. Un sistema di generazione interna dell'energia necessaria al veicolo lo rende chiaramente svincolato dalla presenza di linea di alimentazione aerea:

1. un solo tipo di veicolo è capace di circolare indifferentemente su tutta la rete tranviaria e ferroviaria europea, sotto tutte le tensioni di linea o in assenza di elettrificazione;
2. il prodotto è unico per qualsiasi contesto, non ci sono costi di sviluppo aggiuntivi da sostenere e sono possibili forti economie di scala;
3. in linea teorica la generazione interna rende ottimale il consumo di energia, evitando la dispersione tipica delle reti di distribuzione;
4. l'alimentazione aerea potrebbe scomparire anche nei tratti urbani, rispondendo alla diffusa, anche se discutibile, accusa di inquinamento visivo mossa nei confronti delle linee di contatto aeree.

Un sistema veicolo ad azionamento ibrido necessita però di maggiore manutenzione, possiede un motore Diesel, penalizzante in quanto a rumore, vibrazioni, affidabilità ed ingombri rispetto ad apparati di sola natura elettrica; esso ha inoltre bisogno di componenti di stoccaggio dell'energia, sia in termini di serbatoio di combustibile che di accumulatori o batterie necessarie ad un'ottimale gestione dell'energia a bordo; il veicolo produce inoltre inquinamento in loco e quindi, anche a fronte di un'eventuale maggiore efficienza energetica sistemica, causa un deterioramento dell'immagine del servizio presso il pubblico.

L'uso di veicoli tranviari ibridi non è infatti molto diffuso, anche se esistono alcuni esempi in cui esso si è rivelato una scelta corretta; la città di Sapporo, in Giappone, utilizzò tram diesel per una nuova linea già negli anni '60, sostituendoli però quando una maggiore quota di passeggeri rese possibile l'elettrificazione. La trazione ibrida si collega a scelte di carattere economico anche in casi molto recenti: la linea Camden-Trenton, aperta nel 2003, è stata realizzata in questa modalità.

Anche la rete della piccola cittadina di Nordhausen possiede dal 2003 alcuni veicoli Siemens Combino Duo⁽¹⁰⁾ dotati di un motore V8 da 3,9 lt⁽¹¹⁾: i veicoli effettuano un servizio di tipo tram-treno su una linea non elettrificata, il

⁽¹⁰⁾ Nel maggio 2004 è iniziata la circolazione dei Siemens Combino ad alimentazione Diesel-elettrica sulla linea non elettrificata tra Nordhausen ed Ilfeld; i mezzi sono dotati di un motore BMW da 3,9 litri che sviluppa 190 kW a 4000 giri al minuto, ma sono anche capaci di collegarsi automaticamente alla linea aerea a 600 V presente nel centro cittadino. Cfr. [43].

⁽¹¹⁾ L'intero sistema di generazione è alloggiato in un vano ricavato nell'area passeggeri ed appoggiato direttamente al pianale; la sua installazione ha comportato la soppressione di quattro sedute.

cui adeguamento a tensione tranviaria sarebbe stato poco conveniente; una scelta simile è stata fatta anche a Kassel [9] e si è concretizzata nell'ordine di 10 RegioCitadis di Alstom Diesel-elettrici destinati alle corse verso Wolfhagen.

L'uso di veicoli *Diesel-elettrici* per servizio tram treno deve quindi essere valutato:

- a) come scelta giustificata da un rapporto costi/benefici migliore rispetto alla totale elettrificazione di una linea;
- b) come unica soluzione quando l'elettrificazione non è tecnicamente possibile, ad esempio per la presenza di gallerie di sagoma ridotta;
- c) come scelta sistemica a fronte di un reale vantaggio rispetto a sistemi politensione, soprattutto nell'impianto di linee nuove; tale valutazione va effettuata in relazione ad orizzonti temporali adeguati e tenendo conto anche delle conseguenze sull'immagine del servizio.

I sistemi di azionamento ibrido possono costituire una scelta sistemica percorribile, così come indicato tra le linee guida per lo sviluppo della ricerca in ambito ferroviario delineate dalla Commissione Europea [11]:

"Contenimento di consumi ed emissioni: il sistema ferroviario sta perdendo competitività rispetto a gomma e aria in quanto non è riuscito ad operare gli stessi sensibili miglioramenti per quanto riguarda l'efficienza: non è più sufficiente affidarsi alla pulizia dell'energia elettrica, dimenticandosi del suo processo di generazione. L'industria ferroviaria deve interfacciarsi con i nuovi sistemi di propulsione basati su motori diesel, fuel cell e turbine a gas."

Tale interesse ha dato vita a diversi progetti di ricerca in ambito tranviario, alcuni dei quali dedicati anche al tema dei sistemi tram-treno.

ULEV-TAP⁽¹²⁾

Il progetto di ricerca europeo ULEV, che ha preso il via a Karlsruhe nel 1996, ha visto coinvolti Alstom, Ccm, Kiepe, Imperial College, Ntua, Stcp, TTK, Turbomeca e Uwe; lo scopo prefisso dalla TTK era quello di creare un sistema ibrido in grado di colmare il divario tra una propulsione totalmente elettrica ed una basata su motore diesel, in termini di costi ed impatto ambientale. La soluzione individuata prevedeva una turbina a gas come generatore primario, associata ad un sistema meccanico di immagazzinamento di energia. Nell'esercizio urbano l'architettura dell'ULEV prevede che il generatore operi a regime ridotto: l'energia per la trazione viene fornita direttamen-

⁽¹²⁾ Ultra Low Emission Vehicle - Transport with Advanced Propulsion.

te dall'accumulatore, che risponde ai picchi di potenza legati alle accelerazioni ed immagazzina energia in frenata, mentre il generatore mantiene costante la sua capacità. Nel servizio extra-urbano le prestazioni più alte e, quindi, la maggiore potenza assorbita rendono invece necessario un continuo apporto energetico diretto da parte del generatore, operante a regime variabile.

Sebbene il prototipo ULEV I, realizzato per la conferenza Prosper del 2001, abbia dimostrato la validità generale di un'architettura ibrida, la sua piena operatività si è dimostrata pesantemente compromessa dal non soddisfacente comportamento della turbina a gas. Per questo motivo nel 2003 è stata avviata una seconda fase del progetto ULEV, non ancora conclusa, con lo scopo di integrare diverse tipologie di motori. Lo scopo di ULEV II è quello di sviluppare un progetto modulare di motogeneratore primario, adattabile a diversi tipi di motore e composto di elementi rispondenti a tutti i rigidi requisiti di costi ed affidabilità tipici del settore trasportistico.

La modularità delle componenti dovrebbe offrire totale libertà nella scelta del tipo di motore, mentre la scelta dell'Avanto come piattaforma di riferimento manifesta come il tram-treno sia l'applicazione di riferimento per una simile architettura; rimangono come incognite la possibilità di industrializzazione, i costi di produzione e di manutenzione di un apparato così complesso.

Thales

Il progetto Thales [12] nasce da una joint-venture tra SnCF, Inrets, Alstom, Connex, Edf e Ratp ed ha lo scopo di creare un sistema tranviario privo di catenarie, sfruttando gli ultracapacitori come unità di stoccaggio rapido di energia. Il concetto base è riassumibile in due punti:

- *immagazzinamento di energia a bordo*: un sistema di ultracapacitori può essere in grado di immagazzinare una certa quantità di energia, di restituirla in maniera adeguata all'azionamento e di ricaricarsi in tempi molto brevi;

- *strutture di ricarica rapida alle fermate*: la trazione avviene tramite la sola energia immagazzinata dagli ultracapacitori, che verrebbero ricaricati in corrispondenza delle fermate in tempi analoghi a quelli di una normale sosta; in questo modo il sistema di accumulazione dovrebbe mantenere dimensioni compatibili con la struttura del veicolo.

Il progetto Thales è fortemente incentrato sui sistemi tram-treno: l'assenza di contatto con fonti di alimentazione durante il moto riduce la complessità dell'infrastruttura ed elimina i problemi relativi alla differente alimentazione. L'affidabilità della tecnologia degli ultracapacitori è ancora da determinare, ma promette piena operatività alle basse temperature, centinaia di migliaia di cicli di carica-scarica utili e dimensioni ridotte per i singoli compo-

nenti, che possono essere disposti liberamente in tutto il veicolo.

Accesso in vettura

Non va dimenticato come l'efficacia di un servizio tram-treno, ovvero la sua capacità di effettuare un servizio a carattere regionale con un alto numero di fermate e buona velocità commerciale, risieda anche nel contenere al minimo i tempi di salita e discesa. Il progetto dell'interfaccia di accesso in vettura deve quindi mirare all'ottenimento di dinamiche di movimentazione passeggeri sia rapide che agevoli a tutte le tipologie di utenza: in campo tranviario tutto ciò è stato ottenuto, in tempi abbastanza recenti, grazie al pianale ribassato. Nel caso di un servizio tram-treno il veicolo è però chiamato ad interfacciarsi con differenti geometrie di banchina, in risposta a diversi standard, rendendo più complessa la soluzione del problema.

Al fine di analizzare la natura geometrica dell'interfaccia veicolo banchina verrà assunto come riferimento P_a il punto corrispondente in sezione alla soglia di accesso al

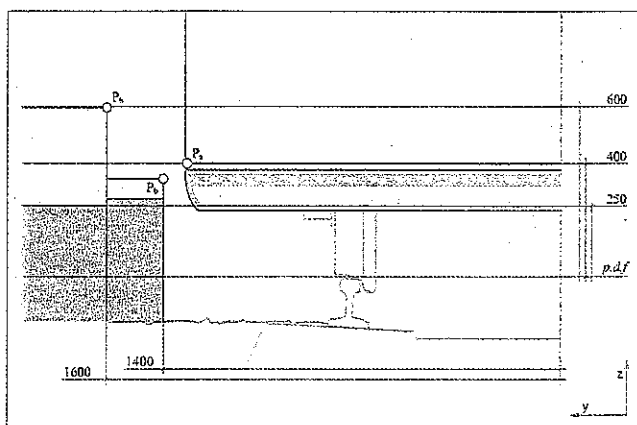


Fig. 4 - Schema riassuntivo delle possibili geometrie caratteristiche delle banchine in ambito ferroviario e tranviario in relazione allo scenario di un servizio tram-treno.

veicolo (fig. 4); la posizione degli elementi verrà definita in rapporto alla quota di mezz'aria del binario posta sul piano del ferro; in tale sistema P_a si pone ad una quota orizzontale compresa tra 1200 e 1325 mm ed ad altezza variabile a partire da un valore di 400mm⁽¹³⁾. Il secondo elemento di riferimento è il punto P_b , corrispondente in sezione al ciglio della banchina: la sua quota orizzontale

⁽¹³⁾ Tale altezza di pavimento è resa necessaria dal maggiore franco richiesto dalla presenza di apparecchiature di binario tra cui, in particolare, i coccodrilli della SnCF.

varia da 1205 a 1330 mm dalla mezzzeria nelle fermate tranviarie ed è di almeno 1650 mm nelle stazioni. L'altezza di P_b sul p.d.f. è invece un dato variabile senza soluzione di continuità a causa della infinita varietà di tipologie di banchina sia in campo tranviario che, soprattutto, in quello ferroviario.

Banchina tranviaria: l'integrazione nel tessuto stradale cittadino rende la fermata tranviaria una struttura molto simile ad un semplice marciapiede. La distanza di P_b dalla mezzzeria di binario è pari alla metà della larghezza del rotabile in esercizio, con un franco solitamente pari a 50 mm; il valore maggiormente variabile è invece quello relativo all'altezza di P_b : essa può variare dalla quota nulla, in totale assenza di strutture di fermata, ad una massima di 350 mm, ancora compatibile con un contesto urbano. Valori più elevati, come ad esempio quelli tipici del Metrolink o del primo progetto del Jumbotram milanese, rappresenterebbero l'inserimento di punti di discontinuità nella fruibilità pedonale dello spazio; quote elevate sarebbero inoltre incompatibili con la circolazione di vetture a pianale alto, di vecchia concezione, dotate di gradini, pedane mobili, porte a soffietto o altre componenti fuori sagoma. Nel caso di un servizio di tipo tram-treno, riferendosi alle considerazioni effettuate sul contesto di implementazione, è possibile applicare due ipotesi semplificative:

1. le vetture tranviarie utilizzate presenteranno, con molta probabilità, una larghezza di 2650 mm: ciò permetterebbe l'adozione di configurazioni 2+2 per le sedute e la riduzione massima del gap orizzontale da colmare tra veicolo e banchina ferroviaria;

2. la linea, di nuova concezione, presenterà ad ogni fermata banchine progettate per un accesso ottimale; il transito di veicoli tranviari per servizio urbano sarà rappresentato solamente da rotabili di nuova generazione, con pavimento a 350 mm s.p.f..

Mediante tali ipotesi la posizione del punto P_b è fissata a 1330 mm in orizzontale e compresa tra 280 e 350 mm in verticale.

Banchina ferroviaria: le strutture di accesso al veicolo in sede ferroviaria presentano una pressoché infinita varietà di geometrie, tanto da non risultare propriamente analizzabili. Grazie alla definizione di una unica sagoma limite UIC valida su tutto il territorio europeo, alla quota orizzontale di P_b può essere attribuito il valore di 1600 mm, indicato nelle nuove normative di riferimento e già riscontrabile nelle nuove realizzazioni; difficilmente inoltre banchine ferroviarie presentano distanze dall'interasse maggiori. La quota orizzontale risulta invece variabile senza soluzione di continuità da un minimo di 250 mm s.p.f. delle vecchie banchine FS ai 900 mm s.p.f. di alcuni marciapiedi di stazione inglesi o tedeschi. Anche in questo caso è possibile ridurre l'intervallo di valori possibili in base a considerazioni relative allo scenario:

1. le banchine presenti sulle linee ferroviarie secondarie

presentano solitamente una quota minore di 500 mm s.p.f., mentre quote maggiori sono associate alla presenza di treni a lunga percorrenza ed alta velocità;

2. un eventuale aggiornamento delle infrastrutture dovrà fare riferimento alla normativa vigente in Europa, la Fiche UIC 741, 1993 la quale indica una quota di 550 mm s.p.f.; in alcune realizzazioni recenti, principalmente a carattere urbano, è anche presente la quota di 600 mm.

Il riferimento P_b risulta quindi posto ad una quota verticale variabile tra 250 e 600 mm, sempre a 1600 mm dalla mezzzeria. In sintesi, si individuano due diversi luoghi di punti P_b attraverso cui rappresentare le possibili geometrie di interfaccia con cui un veicolo tram-treno deve relazionarsi. Risulta evidente come realizzare un facile accesso in vettura sia critico nel caso di un servizio di tipo tram-treno: entrare in un veicolo tranviario a pavimento ribassato in presenza di una banchina ferroviaria può significare, ad esempio, superare un dislivello verticale di 200 mm ed una distanza orizzontale di 275 mm. Una tale dinamica non è chiaramente adeguata all'incaricamento di passeggeri in buone condizioni fisiche, tanto meno per anziani o diversamente abili in carrozzella: è necessario quindi tentare un avvicinamento a quanto prescritto, ad esempio, dalla normativa Unifer.

I sistemi attualmente in esercizio non presentano soluzioni particolarmente interessanti, anche perché caratterizzati da tipologie di veicolo e di banchina ferroviaria particolari: Karlsruhe, Kassel e Saarbrücken presentano piattaforme ferroviarie a 380 mm s.p.f., come da norma EBO per le ferrovie regionali. I veicoli a pianale ribassato di Karlsruhe⁽¹⁴⁾ presentano una pedana mobile che fuoriesce dal sottocassa andando a colmare la distanza tra soglia e banchina alla quota di 400 mm, mentre il pavimento è posto a 580 mm: l'accesso avviene quindi, sia in contesto urbano che suburbano, attraverso un gradino, mentre per i passeggeri in carrozzella è prevista una rampa mobile installata a mano dal conducente. Il tram di Saarbrücken, di più recente progettazione, presenta invece il pavimento posto in corrispondenza delle porte a 400 mm s.p.f., permettendo l'accesso a raso sia in ambito urbano, con banchine alte 380 mm, che suburbano, tramite una pedana mobile, sempre a 380 mm s.p.f.

Le soluzioni adottate a Kassel sono invece più originali e maggiormente indicative della criticità del problema; i vecchi tram utilizzati sulla Kassel-Baunatal sono larghi 2300 mm, quindi distanti 495 mm dalla banchina ferroviaria, ed alti solo 300 mm in corrispondenza delle porte; dato che la linea della KNE è a binario unico ed adibita al solo trasporto merci, sono state adottate due differenti soluzioni:

⁽¹⁴⁾ I Duewag GT8-100D con pianale ribassato al 50% ed accesso a 580 mm; i vecchi GT8-100C, i quali hanno il pavimento posto a 1000 mm con ben tre gradini più uno mobile per l'accesso, non vengono esaminati in quanto dotati di una struttura di vecchia concezione.

1. *Fermate sede di raddoppio di binario*: le due fermate interessate da raddoppio presentano un ramo con binario adibito al solo transito tranviario, con relativa banchina, e l'altro promiscuo attrezzato con quattro rotaie. Le quattro rotaie formano due binari compenetrati: il primo è adibito al transito tranviario e permette l'accostamento del veicolo ad una banchina dedicata, l'altro permette il transito di treni merci ad adeguata distanza di sicurezza dalla banchina stessa.

2. *Fermate semplici*: le banchine sono poste su entrambi i lati e realizzate a un'altezza di 115 mm s.p.f., tale da risultare compatibile con la parte inferiore della sagoma ferroviaria, e poste ad una distanza tale da consentire l'incarozzamento nei tram. In altri termini la banchina si spinge al di sotto della sagoma ferroviaria per raggiungere la soglia del tram, venendo quindi parzialmente ricoperta al passaggio dei convogli ferroviari: tale dinamica è altamente pericolosa. Le fermate sono dotate di segnaletica tattile, visiva e sonora mentre la velocità dei convogli merci viene ridotta, ma la soluzione rimane un compromesso rischioso ed improponibile per applicazione diffusa.

In sintesi il problema dell'incarozzamento, nell'ottica di una maggiore diffusione dei sistemi tram-treno e dell'applicazione delle recenti norme in materia di banchine ferroviarie, appare ancora non risolto in maniera adeguata; allo stesso tempo la qualità dell'accesso, la sua rapidità e la disponibilità a qualsiasi categoria di utenza sono fattori di primaria importanza per garantire efficacia e qualità al nuovo servizio.

Sicurezza

La circolazione di mezzi leggeri su tratte ferroviarie interessate anche da traffico pesante pone in evidenza un grosso interrogativo, quello riguardante la sicurezza: un eventuale urto tra un veicolo tranviario urbano ed una motrice ferroviaria sarebbe chiaramente disastroso. La strategia adottata a Karlsruhe consiste nel garantire un alto livello di sicurezza del sistema incrementando la sua componente attiva, ovvero riducendo drasticamente la probabilità di un urto. Tale decisione, rivelatasi efficace sia al giudizio degli enti normativi che alla prova dei fatti⁽¹⁵⁾, deriva dall'osservazione delle caratteristiche di un veicolo tranviario: mentre la struttura, causa dimensioni e peso ridotti, non può offrire prestazioni di resistenza agli urti adatte al contesto ferroviario, le doti di decelerazione e frenatura sono eccellenti.

In tutti i sistemi oggi operanti come tram-treno i segnali vengono visualizzati sia dai semafori in linea che ripetuti all'interno della cabina, mentre un sistema di protezione (ATP) provvede alla frenatura automatica del con-

voglio nel caso in cui le prescrizioni non vengano rispettate.

Ridurre al minimo la probabilità di sinistri attraverso l'incremento delle prestazioni in frenata ed il segnalamento non elimina però la necessità di una struttura veicolo capace, in caso di urto, di garantire adeguata protezione a passeggeri e personale di bordo. L'introduzione di veicoli leggeri su reti ferroviarie porta a confrontarsi con una normativa che, in merito alla sicurezza passiva, richiede una resistenza al tamponamento di 1500 kN: ottenere una tale rigidità su un veicolo tranviario non è possibile se non a fronte di un inaccettabile aumento di peso. Allo stesso tempo i valori di 200 kN e 400 kN tipici dei veicoli tranviari urbani non sono ammissibili per reti ferroviarie, neanche a fronte del già descritto alto livello di sicurezza attiva: il compromesso ottenuto per le reti tedesche indica nel valore di 600 kN un nuovo possibile standard per applicazioni tranviarie suburbane su tratte promiscue.

Attualmente è la norma EN12663 ad indicare, attraverso cinque diverse classi, i requisiti strutturali dei veicoli ferroviari, tra cui i valori di resistenza a tamponamento in corrispondenza dei respingenti o degli accoppiatori (tab. 6).

TABELLA 6

VALORI DI RESISTENZA A TAMPONAMENTO SECONDO LA ENI 12663 [46]

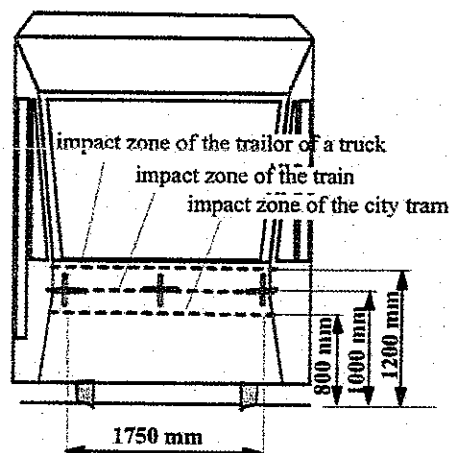
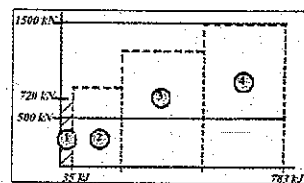
P-I	carrozze e locomotori	2000 kN
P-II	unità a composizione fissa	1500 kN
P-III	veicoli ferroviari metropolitani e sotterranei	800 kN
P-IV	metropolitane leggere e veicoli tranviari pesanti	400 kN
P-V	veicoli tranviari urbani	200 kN

La scarsa copertura del settore tranviario da parte della norma EN12663 e la necessità di un approccio più integrato a livello europeo, anche in relazione all'emergere di nuovi temi come quello del tram-treno, ha condotto all'avvio del progetto Safetram. Obiettivo del progetto è fornire un parametro tecnologico volto alla definizione di nuovi standard di sicurezza passiva applicati ai veicoli tranviari; lo studio delle dinamiche di impatto, attraverso modelli matematici e test dinamici, è cioè volto alla progettazione di due differenti tipologie di strutture di riferimento per le estremità di veicoli urbani e suburbani [13]. Il processo di definizione è partito dallo studio delle normative vigenti, in Europa e stati Uniti, riguardo a resistenza agli urti nei campi ferroviario, tranviario ed automobilistico; sono state quindi definite specifiche di progetto (tab. 7) relative a vincoli geometrici, massima entità di impatto tollerabile, massima deformazione ammissibi-

⁽¹⁵⁾ Sia a Karlsruhe che a Saarbrücken e Kassel non si sono mai registrati incidenti relazionabili alla condivisione di binario.

REQUISITI DI PROGETTO PER UN TRAM SUBURBANO. SAFETRAM

classe di requisito	descrizione
sistema antisormonto	i dispositivi antisormonto devono resistere a forze verticali fino a 150 kN, spostamenti verticali fino a 50 mm, essere compatibili con i respingenti dei vagoni merci ferroviari.
prevenzione intrusione	l'intrusione di elementi interni nell'area passeggeri è evitata grazie al limitato valore di decelerazione, presente in tutti gli scenari di collisione ed inferiore alla capacità dei sistemi di fissaggio delle apparecchiature.
assorbimento di energia	il veicolo dovrebbe assorbire l'energia relativa ad ogni singola configurazione di scenario in maniera controllata; il collasso strutturale deve quindi essere confinato in aree designate della struttura, preservando lo spazio vitale di equipaggio e passeggeri. La resistenza longitudinale a tamponamento è di 600 kN, la massima intensità di impatto tollerata pari a 1500 kN.
contenimento decelerazione	la decelerazione ipotizzata in tutti gli scenari non supera il valore di 3g, quindi è ammissibile una progettazione secondo un criterio di 5g.
prevenzione deragliamento	il rischio di deragliamento va contenuto facendo sì che l'urto di ostacoli sul binario non provochi il distacco tra carrelli e cassa. Per i tram suburbani non risulta necessario adottare un deflettore di ostacoli di tipo ferroviario se il franco tra pianale e piano del ferro è limitato; risulta in questo caso sufficiente un deflettore di tipo tranviario.
compatibilità	la struttura va configurata in base a diverse possibili coordinate verticali della zona d'impatto.
Visibilità	un ostacolo alto 1,2 m sul p.d.f. e distante 0,3 m dal fronte del veicolo deve essere visibile.
area di sopravvivenza	il veicolo deve salvaguardare lo spazio di sopravvivenza ed impedire intrusioni: la distanza tra banco di manovra e sedile non deve scendere al di sotto di 300 mm, oppure la distanza tra il banco di manovra e la parete posteriore della cabina non deve essere minore di 750 mm.
posizionamento accoppiatore	l'accoppiatore può anche non contribuire all'assorbimento di energia, ma la sua disposizione non deve in ogni caso impedire il corretto funzionamento degli altri elementi preposti; esso dovrebbe essere utilizzato come interfaccia in caso di urto con treno con accoppiatore centrale.
altri requisiti	deve essere previsto lo spazio per l'installazione dell'impianto radio ed il livello del pavimento della cabina conseguentemente specificato.



le ed interfaccia con l'elemento di collisione.

Il progetto dovrebbe essersi concluso il 30 luglio, ma risulta possibile individuare alcune linee guida nella composizione del modello di struttura Safetram per tram suburbani: la dinamica di urto determina l'attivazione di componenti differenti. Gli elementi di assorbimento dell'urto sono capaci di una deformazione reversibile sufficiente per fronteggiare urti di limitata entità; al crescere dell'intensità della forza intervengono gli elementi a deformazione plastica programmata dei respingenti, nel caso di urto con veicoli ferroviari, o la struttura centrale a nido d'ape. Questo componente è in comune con il modello di struttura per tram urbano ed è già stato testato presso Alcan; un terzo grado di assorbimento della forza d'urto è infine assicurato da elementi a deformazione programmata presenti nella struttura portante della cabina. Le caratteristiche della struttura Safetram rivestono particolare importanza nell'economia di un sistema prodotto per veicoli tram-treno, sia perché semplificano l'approccio al tema della sicurezza passiva definendo un modello valido per tutta l'Europa, sia perché impongono precisi vincoli di progetto.

Parallelamente allo sviluppo delle problematiche fin qui elencate, i principali produttori di veicoli ferroviari mostrano già di possedere alcune soluzioni di prodotto specifiche per servizio tram-treno; la loro validità, provata dal reale esercizio nel caso di Bombardier e, recente-

mente, di Alstom, costituisce un'ulteriore prova del livello di accessibilità di una soluzione tram-treno.

Alstom Citadis 500

La soluzione Alstom per il servizio tram-treno è una declinazione del sistema prodotto Citadis, nato per applicazioni puramente tranviarie, denominata 500, Regio o Dualis [14]; il veicolo si differenzia dalla serie tranviaria 300, utilizzata ad esempio a Torino o Bordeaux, per dotazione e struttura delle casse (tab. 8).

Il progetto di massima è stato presentato nel 1999 e nel Dicembre 2001 la KVG di Kassel ha siglato il primo, e finora unico, contratto di fornitura. L'accordo prevede l'acquisto di 28 veicoli, di cui 18 bitensione e 10 ibridi con generatore Diesel, composti da tre casse e lunghi 36,5 m; il veicolo preserie bitensione è stato presentato a Kassel nel Luglio 2004, le prove sono iniziate a fine Settembre 2004 e l'esercizio è già iniziato⁽¹⁶⁾.

Il Citadis 500 è dotato alle estremità di due carrelli motori con sale convenzionali ad assili ed al centro di carrelli portanti a ruote indipendenti, conciliando in tal modo un migliore comportamento dinamico alle alte velocità con la possibilità di mantenere il pianale ribassato; il rodiggio rimane in ogni caso di tipo tranviario, con componenti in comune con il resto della piattaforma Citadis al fine di mantenere bassi i costi di acquisto e di manutenzione. Il veicolo è dotato di tutti i dispositivi di sicurezza attiva e passiva necessari secondo le norme tedesche EBO e BOStrasse, la cabina presenta apparati per la ripetizione dei segnali a bordo ed è protetta da una struttura a nido d'ape capace di assorbire 350 kJ pur senza penalizzare, col suo ingombro, la visibilità; esso si compone di tre sezioni di lunghezza variabile con pianale posto a 420 mm sul p.d.f., tranne in corrispondenza dei carrelli con assili, dove si raggiunge la quota di 650 mm⁽¹⁷⁾. Nella configurazione scelta a Kassel, con i due carrelli centrali a ruote indipendenti, il pianale ribassato arriva a coprire il 75% del totale, mentre le aree residue, poste alle estremità, sono collegate da un gradino; la carrozza centrale non presenta aperture, offrendo quindi molti posti a sedere in configurazione 2+2.

Bombardier Flexity Link

Il primo ed unico lotto di veicoli prodotti è entrato in esercizio nel 1997 a Saarbrücken con la denominazione S1000 ed ha dimostrato una buona affidabilità, prestazio-

TABELLA 8

CARATTERISTICHE DEL REGIOCITADIS DI ALSTOM
OFFERTO PER LA COMMessa DI KASSEL

lunghezza	36500	mm
larghezza	2650	mm
altezza	3650	mm
scartamento	1435	mm
raggio minimo	22/20	m
carico per asse	11	t
resistenza a tamponamento	600	kN
altezza pavimento (s.p.f.)	420 (650)	mm
posti a sedere	98	
posti in piedi	140	
rodiggio	Bo'2'2'Bo	
velocità massima	100	km/h
potenza massima	4 x 150	kW
alimentazione	600/750 V cc + 15 kV ca 162/3 Hz 600/750 V cc + 25 kV ca 50 Hz 600/750 V cc + 1500 V cc 600/750 V cc + Diesel	

⁽¹⁶⁾ Dr. Heribert MENZE, tram-Kassel, www.tram-kassel.de

⁽¹⁷⁾ Il pianale è invece integralmente a 650 mm nel caso in cui l'azionamento preveda l'ingombrante trasformatore per la marcia sotto rete alimentata a 15 kV.

TABELLA 9

CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEL VEICOLO S1000
DI BOMBARDIER TRANSPORTATION

lunghezza	37000	mm
larghezza	2650	mm
altezza	3880	mm
scartamento	1435	mm
raggio minimo	35/23	m
carico per asse	10	t
resistenza a tamponamento	600	kN
altezza pavimento (s.p.f.)	400(600)	mm
posti a sedere	96	
posti in piedi	147	
rodiggio	Bo'Bo'Bo'Bo	
velocità massima	100	km/h
potenza massima	8 x 120	kW
alimentazione	600/750 V cc + 15 kV ca 162/3 Hz	

ni di rilievo e compatibilità sia con la rete ferroviaria DB che con quella SNCF⁽¹⁸⁾.

Il Bombardier S1000 per Saarbrücken è dotato di quattro carrelli motori in quanto chiamato a superare lungo il tragitto pendenze dell'8%; tutti i carrelli sono di tipo convenzionale ad assili, garantiscono una marcia sicura anche su sede ferroviaria ma si sono rivelati molto rumorosi nel regime tranviario, obbligando a ridurre la velocità nelle vie del capoluogo della Saar. Per ora si hanno dati solamente riguardo all'azionamento bitensione dell'S1000 progettato per la linea tedesca, ma l'offerta di Bombardier contempla l'ipotesi di azionamenti bitensione, tritensione ed ibridi. Il prodotto di Bombardier rappresenta un ottimo esempio di integrazione di diversi regimi normativi in quanto progettato per operare secondo le normative tedesca e francese, con un sistema di protezione automatica Indusi 60R⁽¹⁹⁾ in grado

⁽¹⁸⁾ I treni di Saarbrücken sono stati utilizzati anche sulla linea di Kassel, per un esercizio sperimentale in attesa dei nuovi veicoli Alstom, dove hanno però manifestato alcuni difetti di progettazione responsabili di ripetuti danneggiamenti alla linea aerea.

⁽¹⁹⁾ INDUSI è l'acronimo di "Inductive Signal Protection", chiamato anche sistema "PZB". Il Sistema INDUSI fu sviluppato nel 1934, quando erano ancora in uso segnali semaforici meccanici; si decise di utilizzare dei magneti perché non richiedevano alcun tipo di alimentazione elettrica. Il sistema previene il superamento di segnali disposti a via impedita: le informazioni sono acquisite mediante l'uso di magneti collocati sul lato destro del binario, mentre un altro magnete, installato sulla locomotiva, continua ad emettere un campo magnetico con frequenze variabili (500 Hz, 1000 Hz o 2000 Hz). Il magnete posto sul binario contiene un circuito a risonanza passiva in grado di accordarsi alle frequenze emesse dal locomotore.

di dialogare anche con i coccodrilli della rete SNCF. La cabina, completa di sistemi di ripetizione a bordo dei segnali, è progettata per un carico a compressione di 600 kN ad un metro s.p.f. ma non presenta elementi per l'assorbimento dell'energia; la posizione di guida risulta molto avanzata, il layout è di tipologia tranviaria e l'ambiente comunica con il vano passeggeri. La struttura è articolata su tre casse di cui la centrale, poggiata su due carrelli, presenta un ambiente continuo, senza aperture, con una disposizione 2 + 2 su tutta la lunghezza ad una quota di 805 mm s.p.f.

Le casse alle estremità presentano invece un pianale a 400 mm nell'area interessata dalle porte e dalla zona polifunzionale, mentre le zone direttamente sopra ai carrelli sono poste a 600 mm, collegate da un gradino; la maggiore altezza del vano centrale, raggiungibile attraverso due rampe lunghe 60 mm, è dovuta all'alloggiamento nel sottocassa di alcune apparecchiature.

TABELLA 10

CARATTERISTICHE DELL'OFFERTA SIEMENS
AVANTO PER SNCF

lunghezza	27000 ÷ 37000	mm
larghezza	2400 ÷ 2650	mm
altezza	3520	mm
scartamento	1435	mm
raggio minimo	20	m
carico per asse	11,5	t
resistenza a tamponamento	600	kN
altezza pavimento (s.p.f.)	380(655)	mm
posti a sedere	72 ÷ 113	
posti in piedi	183 ÷ 260	
rodiggio	Bo'2'2'Bo	
velocità massima	105	km/h
potenza massima	4 x 200	kW
alimentazione	600/750 V cc + 15 kV ca 162/3 Hz 600/750 V cc + 25 kV ca 50 Hz 600/750 V cc + 3000 V cc 600/750 V cc + 1500 V cc 600/750 V cc + Diesel	

Tale accorgimento risulta sufficiente nel caso di Saarbrücken in quanto le banchine della Saarbahn sono poste a quota massima di 400 mm, ma impedisce allo stesso tempo l'utilizzo di pedane mobili per l'accesso di disabili dalle quote inferiori riscontrabili in alcuni contesti urbani.

V.2. Siemens Avanto

Siemens risulta oggi il gruppo maggiormente esposto nel contesto dei sistemi tram-treno: dopo aver acquisito la tedesca Duewag, costruttrice dei tram di Karlsruhe, il gruppo si è aggiudicato la commessa di SnCF con il progetto Avanto/S70 [15], parte della piattaforma Combino. Il veicolo è ancora in fase di definizione, una maquette di cabina ed interni è stata presentata nel Luglio del 2004 a Parigi, dove dovrebbe trovare impiego a fine 2005 nella linea Aulnay-Bondy.

Anche per l'Avanto il rodiggio presenta una configurazione basata su due carrelli motori ad assili alle estremità e due portanti a ruote indipendenti, ma questi ultimi sono solidali con due carrozzini portanti di ridotta lunghezza, uniti da una sezione sospesa; grazie a motori molto potenti il dato di accelerazione è il più alto, $1,3 \text{ m/s}^2$. I carrelli sono identici a quelli utilizzati nel veicolo S70 in esercizio a Houston, tranne per i magneti, le antenne degli apparati di sicurezza e la sospensione non idropneumatica.

Per quanto riguarda gli azionamenti, Siemens dichiara la compatibilità con tutte le tensioni di esercizio possibili in Europa, mentre per una soluzione ibrida il gruppo può sfruttare già l'esperienza derivata dai veicoli Combino per Nordhausen. L'Avanto dovrebbe inoltre essere capace di dialogare con sistemi KVB, SAEIV e ATESS in uso presso SnCF; la struttura frontale è capace di resistenza a compressione fino a 600 kN ed è dotata di una zona a deformazione progressiva secondo norma DIN 5560⁽²⁰⁾. Il veicolo si compone di cinque casse, due alle estremità con doppia porta per lato, due carrozzini solidali ai carrelli portanti ed una sezione intermedia sospesa dotata di una porta per lato; il pianale è ribassato nella gran parte del veicolo, mentre sale a quota 655 mm sopra i due carrelli motori, generando un gradino. Il costo preventivato per ogni veicolo dovrebbe aggirarsi, nel

⁽²⁰⁾ La struttura a deformazione programmata, secondo tale norma, deve essere tale che un urto con veicolo di riferimento di 80 t a 8 km/h non provochi deformazioni permanenti sulla struttura della cassa; fino ad una velocità di 25 km/h viene assicurato lo spazio di sopravvivenza per il macchinista.

caso della fornitura dei ben 35 veicoli per Parigi, attorno ai 3,4 milioni di Euro.

BIBLIOGRAFIA

- [1] François BATISSE - *Le tram-train: un phénomène mondial*, Rail International, Aprile 2000 - pp. 28-36.
- [2] ScanRail Consult - *Rolling stock market study for tram-train vehicles*, Crossrail, Marzo 2001.
- [3] Sergio VIGANÒ - *Considerazioni di fattibilità di un metrolam bitensione 600V/3000V per Milano*, Trasporti e Trazione 3, 1994 - pp. 116-120.
- [4] M. NOVALES, M. BUGARIN, A. ORRO, trad. M. ANTOGNOLI - *Un nuovo concetto nel trasporto Urbano: il tram-treno*, Ingegneria ferroviaria 10/2001 - pp. 741-751.
- [5] ScanRail Consult - *Rolling Stock Functional Requirements Specification*, Crossrail, Marzo 2001.
- [6] A. GACHE - *Karlsruhe, un exemple a mediter...*, Chemin de fer, 5, 1993.
- [7] D. LUDWIG et al. - *Erfahrungen mit der ersten stadtbahn auf bundesbahngleisen*, Der Nahverkehr II, 1994.
- [8] Wolfgang MEYER - *Le projet européen de tram-train Saar-Lor-Lux*, Transport Public International 3, 2003 - pp. 24-27.
- [9] Aa.Vv. - *Le tram-train de Kassel*, Le Rail 93, Maggio 2002.
- [10] External advisory Group for the Land Transport and Marine Technologies - *Key Action in the V EU Research and Technological Development Framework Programme*, Bruxelles, Febbraio 2001.
- [11] M. AVART, J. CHABAS - *Hybrid tram-trains: taking the wireless track on urban routes*, Urban Transit Technology, 2002.
- [12] Passive Safety of Tramways for Europe - *Safetram - Mid Term Report*, Gennaio 2003.
- [13] René TUZZAUER - *Citadis 500: linking city centres to the region*, Urban Transport International 24, 1999 - pp. 35.
- [14] Aa.Vv. - *Avanto, il tram-treno di SnCF*, Ingegneria Ferroviaria 2, 2003 - pp. 163-168.