POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Autostrada ferroviaria e trasporto stradale lungo la direttrice del Frejus: analisi di scenari mediante un modello di rete

Original
Autostrada ferroviaria e trasporto stradale lungo la direttrice del Frejus: analisi di scenari mediante un modello di rete / Deflorio, FRANCESCO PAOLO; DALLA CHIARA, Bruno; GONZALEZ FELIU, J.. - In: INGEGNERIA FERROVIARIA. - ISSN 0020-0956. - STAMPA. - 10:(2005), pp. 815-825.

Availability:
This version is available at: 11583/1399370 since:

Publisher:
CIFI (Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani)

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

28 April 2024

Autostrada ferroviaria e trasporto stradale lungo la direttrice del Frejus: analisi di scenari mediante un modello di rete

Dott. Ing. Francesco DEFLORIO[*], *Prof. Ing. Bruno* DALLA CHIARA[*], *Dott. Ing. Jesus* GONZALEZ FELIU[**]

1. Introduzione

Nell'ambito del trasporto merci, l'*autostrada viaggiante* è una tipologia di trasporto combinato, strada-rotaia, che prevede il caricamento di veicoli stradali completi, con o senza conducente a bordo, su vagoni ferroviari mediante tecniche *Ro-Ro* (*roll on - roll off*), quindi utilizzando la trazione del veicolo stesso, se esiste, o una trazione di servizio; qualora il conducente non si trovi a bordo dell'autoveicolo, potrebbe trovarsi in temporaneo alloggiamento in una carrozza ferroviaria facente parte del convoglio, costituito per la parte restante da una o più locomotive e carri merci, su uno dei quali è caricato l'autoveicolo stesso.

Il servizio di autostrada viaggiante - nel caso specifico denominato di *autostrada ferroviaria* - prevede, oltre al carico del veicolo stradale completo, quindi motrice e (semi)rimorchio, il trasbordo sul treno di soli semirimorchi. Ciò riconduce il servizio di autostrada ferroviaria ad una forma di trasporto combinato non accompagnato di unità di trasporto intermodali [13].

Per motivi di traffico stradale, energetici ed ambientali, soprattutto in corrispondenza dei valichi montani, risulta di particolare interesse l'aumento della potenzialità delle linee ferroviarie [5]. Tale aumento può essere realizzato mediante la costruzione di nuove linee o migliore sfruttamento di quelle esistenti. L'aumento di capacità delle linee si ottiene, come noto, mediante l'esercizio di treni ad alta velocità oppure di treni ad assetto variabile, nel caso del trasporto di passeggeri; per quanto riguarda il trasporto merci, si può perseguire una maggiore capacità aumentando la lunghezza dei convogli, una volta stabilito che lo sfruttamento della linea è massimo sulla base della frequenza del servizio, delle tecnologie disponibili ed installate.

Laddove occorra attraversare dei valichi, sovrastrutture congestionate o territori con contingentamento al transito, il trasporto combinato accompagnato rappresenta una possibile alternativa al trasporto interamente stradale, con il vantaggio di non richiedere all'autotrasporto grandi trasformazioni. Esistono sistemi attuati mediante il trasporto di veicoli stradali completi su carri ferroviari a pianale completamente ribassato per tutta la loro lunghezza [10] – con ruote di diametro ridotto – ed il sistema Modalhor, recentemente introdotto per l'attraversamento del valico Italia-Francia sulla direttrice Torino-Lione, che utilizza carri ribassati dotati di carrelli tradizionali. In entrambi i casi, il fine è rendere la sagoma del carro completo compatibile con il *gabarit* ferroviario (UIC, *Fiche 505-1* e *Fiche 596-6*). In [8] sono comparati i sistemi alternativi e le relative caratteristiche progettuali. La tabella 1 riporta la codifica UIC *Fiche 596-6* della sagoma limite ferroviaria. Anche il tipo di container ammesso, rispetto alla sagoma, dipende dal tipo di carro utilizzato; per le casse mobili, più larghe dei container marittimi, l'altezza massima ammissibile, a

TABELLA 1

CODIFICA UIC 596-6 DELLA SAGOMA LIMITE FERROVIARIA

Codifica	Altezza [m]	Container ammessi altezza	Autostrada viaggiante
P/C00	3,63	-	-
P/C22 o sagoma/gabarit A	3,85	8' (~2,5m)	-
P/C25	3,88	8' (~2,5m)	-
P/C30	3,93	8'6" (~2,6 m)	Attualmente con altezza 3.75 m con carri tipo Modalhor
P/C32	3,95	8'6" (~2,6 m)	-
P/C45 o sagoma/gabarit B	4,08	8'6" (~2,6 m)	-
P/C50	4,13	8'6" (~2,6 m)	-
Gabarit B+ o B1 P/C55	4,18	9'6" (~2,9 m)	Automezzi pesanti (ptt = 44t e h = 4 m o 4030 mm, ma fuori sagoma stradale attuale) con carri tipo Modalohr
P/C60	4,23	9'6" (~2,9 m)	- -
P/C80	4,43	9'6" (~2,9 m)	Automezzi pesanti (ptt = 44t e h = 4 m) con carri ultrabassi

[*] Politecnico di Torino - Dipartimento DITIC-Trasporti.

[**] Politecnico di Torino - Dipartimento DAUIN-Ricerca Operativa.

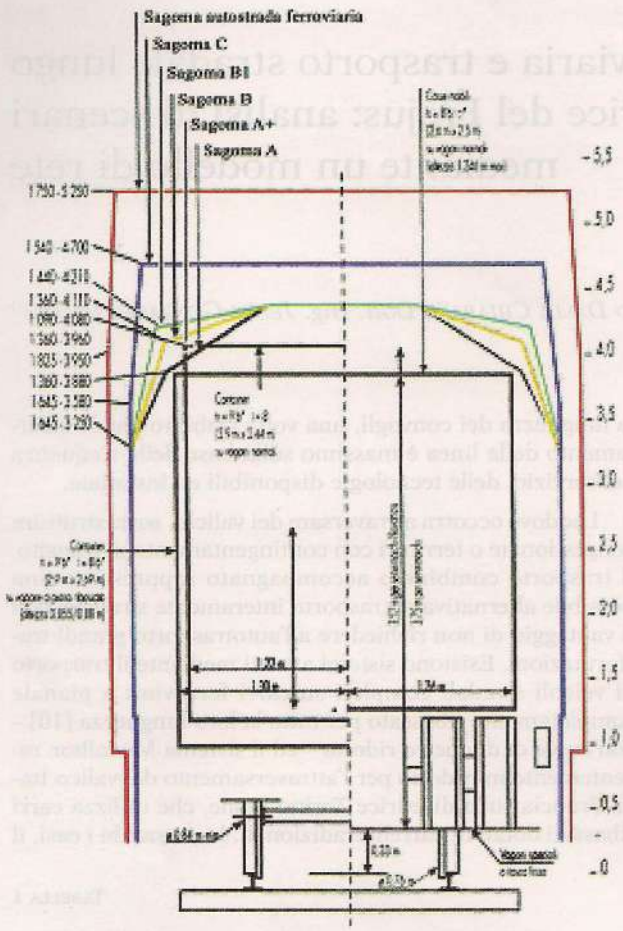

Fig. 1 - Profili di riferimento delle sagome: materiale e carico ammesso. [Fonte: Alpetunnel GEIE, 1998].

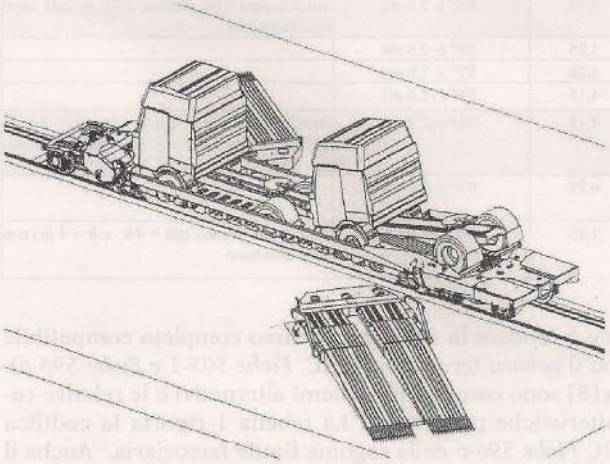

Fig. 2 - Una vasca da carico del carro Modalohr con due trattori stradali.

parità di sagoma e di carro, è più bassa (fig. 1); sulla direttrice in questione sono in atto i lavori di adeguamento dalla sagoma P/C30 alla sagoma B1.

Caratteristica di questo sistema (figg. 2 e 3) è la possibilità di fare accedere i veicoli al piano di carico d'ogni vagone in modo indipendente. L'apertura del vagone per l'accesso si realizza mediante la rotazione della vasca attorno al perno centrale del vagone. Il caricamento, a cura degli stessi conducenti, viene realizzato in terminal attrezzati con l'assistenza di un operatore. Il carico del semirimorchio viene effettuato utilizzando il trattore stradale, poi sganciato e caricato sul vagone adiacente.

In fig. 2 è mostrata la modalità di caricamento di una vasca da carico di un carro del treno-navetta Modalohr. Essa può trasportare sia due trattori stradali, uno in posizione orizzontale ed il secondo con l'asse posteriore che poggia sulla falsa ralla d'appoggio, sia un semirimorchio a tre assi, posizionato in senso contrario a quello di marcia, appoggiato anch'esso alla falsa ralla e con le zampe ben posizionate sulla vasca da carico.

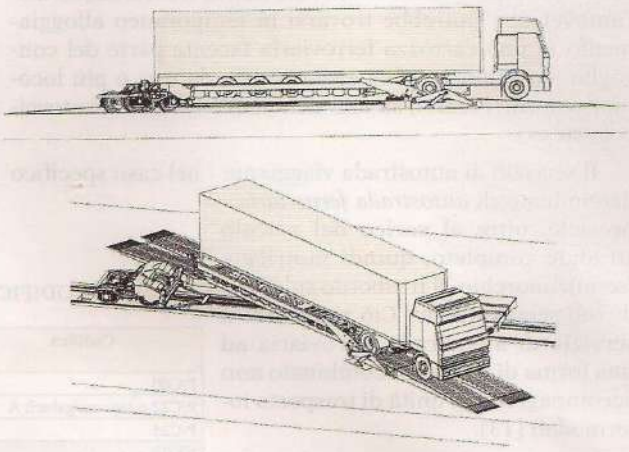

Fig. 3 - Caricamento di una vasca di un carro tipo Modalohr: procedura relativa ad un semirimorchio.

Peraltro, l'allungamento dei convogli ferroviari appare oggi come una possibilità utile e realizzabile. In effetti le raccomandazioni derivanti dalle *fiche* UIC, cui fanno riferimento anche le ferrovie nazionali, impongono restrizioni tecniche oggi rivalutabili, in particolare proprio quelle riferite alla lunghezza.

Secondo l'accordo AGCT[1] del 1999 [14], per i convogli merci si parla di una lunghezza teorica di 700 per 750 m (la lunghezza reale è di circa 500 m). Tale restrizione fa

[1] AGCT: European agreement on important international combined transport lines and related installation.

riferimento ancora a vecchi carri ad assi e organi d'aggancio con limiti di resistenza bassi, oggi superati. Su questo tema si stanno orientando diversi organi italiani[2] e europei[3] che si occupano di trasporto ferroviario. In ambito del trasporto passeggeri vi è la possibilità odierna di realizzare carrozze a due piani senza variare la lunghezza; nel trasporto merci invece esiste la possibilità di allungare i treni con lo scopo di trasportare una quantità di merce assai superiore di quella attuale.

L'allungamento dei convogli risulta tuttavia un tema tecnico articolato; sono infatti da considerare diversi aspetti di tipo meccanico ed elettrico: sollecitazioni di trazione e repulsione, spazio di arresto, frenatura, potenza richiesta, cadute di potenziale in linea. L'allungamento dei treni è un'ipotesi fortemente influenzata dallo sviluppo di nuovi sistemi frenanti, seppure esistano già modelli di frenatura sperimentali funzionanti.

Quanto alla trazione, all'aumentare del carico richiesto (per i treni ad alta velocità si hanno carichi elevati proprio per le richieste di velocità sostenute) deve diminuire il distanziamento relativo delle sottostazioni. Per quanto riguarda i treni merci, l'allungamento dei convogli stessi comporterà un aumento del carico richiesto, non più a causa di elevate velocità ma dovuto all'aumento consistente di massa del treno. Può essere allora necessario, anche in questo caso, avvicinare le sottostazioni al fine di evitare cadute di tensione in linea troppo elevate. Non trascurabili sono anche i problemi legati all'infrastruttura, in particolare i binari di precedenza, i binari operativi, di sosta e di manovra, di presa e consegna nei terminali, nei quali devono essere accolti eventuali treni con lunghezza elevata.

Infine, importante è considerare, come valutazione degli effetti - sull'aumento della capacità - dell'allungamento dei treni merci, anche lo studio della potenzialità della linea con circolazione preesistente[4], in modo tale da poter includere treni più lunghi che non compromettano la qualità del servizio offerto, evitando cioè disagi di ritardo.

Sulla base delle caratteristiche operative del servizio, degli attributi dei percorsi stradali e della struttura della domanda, si vuole valutare l'utilizzo del trasporto combinato, quindi prevedere in che misura esso possa influenzare la ripartizione del trasporto merci, fra il tradizionale percorso stradale ed il nuovo servizio offerto, mediante l'adozione di un modello di rete.

La valutazione delle scelte modali del trasporto merci è usualmente condotta mediante analisi della domanda, descritta con modelli di scelta fra alternative, caratterizzate da attributi ritenuti rilevanti per gli utenti. Tali modelli sono successivamente calibrati sulla base di indagini di tipo *Revealed Preferences* (RP) o *Stated Preferences* (SP) al fine di determinare i pesi dei vari attributi per le alternative ed il grado di aleatorietà che gli utenti manifestano nella scelta. In questo contesto si possono citare numerose ricerche ([1], [3]) applicate al trasporto merci.

Gli attributi più rilevanti da considerare per la scelta modale nel settore merci sono stati individuati in [7] al fine di condurre un'indagine di tipo *Stated Preferences*.

Gli autori, seguendo l'approccio della *Content Analysis*, individuano una serie di categorie di attributi influenti sulla scelta modale nel trasporto merci e le ordinano in base alle preferenze espresse dai campioni. Con questa procedura le categorie più rilevanti di attributi risultano: variabilità del tempo di viaggio, costo, velocità.

Esiste inoltre un approccio alternativo, adottato in questo studio, che consente di valutare le scelte modali descrivendole con un modello di rete, al fine di esplicitare il fenomeno della congestione che può coinvolgere i servizi analizzati (attese per i controlli al tunnel e per il carico dei veicoli sul treno) e rendere agevole la stima del tempo della spedizione per i diversi percorsi disponibili fra le coppie Origine Destinazione dell'area di studio.

Tale attributo, sulla base dei risultati di altri studi e delle indagini condotte mediante interviste ai conducenti, presso l'autostrada del Frejus e, telefonicamente, ad un campione di aziende di trasporto è ritenuto il fattore prevalente nella scelta, seguito dal costo monetario.

In questo contesto si cita lo studio condotto da BEUTHE *et al.* [2] mediante un modello di rete, in cui sono stimate le elasticità incrociate della domanda per tre sistemi di trasporto merci (strada, ferrovia e navigazione interna) usando una rete multimodale, costruita da un GIS relativo al sistema di trasporto del Belgio.

La stima delle elasticità è ottenuta assegnando la domanda merci, rappresentata da matrici O-D con riferimento a dieci categorie merceologiche. La ripartizione modale avviene quindi su rete e mostra che le elasticità (variazioni delle quantità trasportate, in seguito ad una riduzione dei costi pari al 5%) per le diverse categorie merceologiche sono notevolmente diverse tra loro e sono anche funzione della lunghezza del viaggio. Tali risultati sono confermati da altri studi, citati dall'autore, condotti con metodologie diverse.

---

[2] In particolare *TRENITALIA*-UTMR-Direzione ricerca-Ingegneria e costruzioni-Sperimentazione: vedi rivista "La Tecnica Professionale" n.9/settembre 2004.

[3] L'Unione Europea sta già sviluppando politiche di trasporto basate su reti ad alta velocità ove transiteranno treni di oltre 2250m.

[4] Esiste il caso di circolazione completa da programmare (caso di una linea di nuova costruzione o ristrutturata sulla quale si debba stabilire ex-novo il programma di esercizio); assai più frequente è il caso del calcolo della potenzialità di una linea con circolazione preesistente in cui vi è la possibilità di aggiungere altre nuove tracce a quelle esistenti senza modificare o procurare ritardi a queste ultime.

2. Il modello proposto

L'obiettivo di questo studio è valutare gli effetti di possibili variazioni delle caratteristiche del servizio di autostrada viaggiante, che nel caso analizzato è in competizione, per il superamento delle Alpi tra Italia e Francia, con il tradizionale trasporto su strada. A tal fine è stato costruito un modello matematico che permette di riprodurre i due tipi di trasporto, dal punto di vista delle loro prestazioni e determinare possibili distribuzioni degli utenti fra i due servizi.

Si è quindi utilizzato un modello di rete che consente di rappresentare l'offerta dei due tipi di servizi nel contesto esaminato, stradale e combinato, mettendo in relazione le prestazioni dei servizi stessi con il loro grado di utilizzo. Infatti il modello riproduce il fenomeno della congestione per alcuni archi significativi della rete, al fine di rappresentare il fenomeno dell'attesa sia per i controlli al tunnel stradale sia per il caricamento dei semirimorchi sul treno.

Al fine di focalizzare l'attenzione sui fattori prevalenti sulla scelta, in questa ricerca è stato adottato un modello di tipo deterministico (si sceglie il percorso con il costo più basso, senza tenere conto di fattori aleatori) e di tipo stazionario, assumendo pressoché indipendenti dal tempo i flussi durante il periodo analizzato. La scelta è valutata dagli operatori prevalentemente in base al tempo di viaggio, ma considera il fenomeno della congestione, poiché il sistema, almeno in alcune componenti, è influenzato dal suo utilizzo. Si pensi, ad esempio, all'attesa per le operazioni di controllo del veicolo prima della galleria o per le operazioni di carico sul treno.

Il carattere aleatorio della scelta, già studiato in una ricerca precedente [6] in questa fase non è stato simulato. Nel modello non si analizzano, inoltre, sia le scelte modali che avvengono esclusivamente con ferrovia, sia le altre modalità di trasporto, ad esempio quella marittima, perché si assume che esse non siano in competizione con le alternative esaminate.

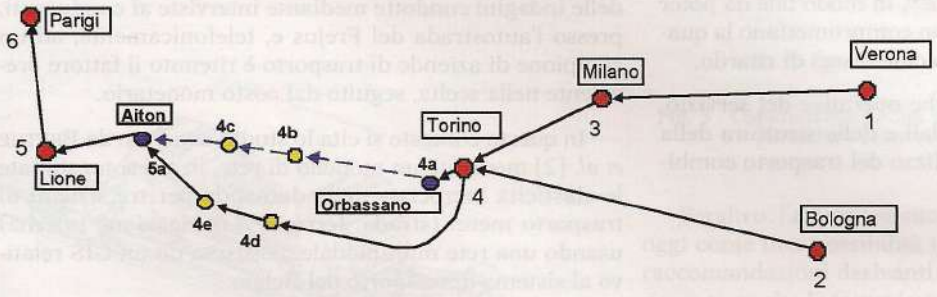

Fig. 4 - Schema della rete in analisi.

Nel caso studio si valutano quindi le spedizioni dall'Italia verso la Francia (fig. 4) che seguono i percorsi stradali più significativi attraverso il traforo del Frejus (4d - 4e) e quelli che comprendono il servizio di trasporto combinato (4b – 4c).

I percorsi rappresentati nel modello sono quelli che collegano le principali città del Nord Italia (Bologna, Milano, Torino e Verona) a Lione e Parigi, in Francia. Altri percorsi non sono stati considerati in quanto i flussi rilevati sono considerevolmente inferiori a quelli inclusi nel modello.

La fig. 4 mostra che tutti i percorsi passano fra i nodi di Torino e Lione e, con riferimento al servizio di trasporto combinato, ci sono sempre due alternative. La prima è quella del trasporto tradizionale tutto strada, in cui da Torino si prosegue per l'autostrada A32 verso il traforo del Fréjus, si attende per eseguire i controlli di sicurezza, soprattutto nel caso di merci pericolose, e si attraversa la galleria; in Francia, si prosegue verso Lione e Parigi via Aiton.

La seconda alternativa è quella in cui si usa il servizio di autostrada viaggiante: in questo caso, da Torino si prosegue verso il Centro Intermodale di Orbassano dove è accessibile il servizio. Dopo le operazioni di carico del treno, c'è il tragitto verso Aiton, la successiva fase di scarico dei veicoli dal treno e la prosecuzione del viaggio verso Lione e Parigi su strada. In entrambi i casi, la merce viaggia sempre all'interno del veicolo ed è solo scaricata a destinazione. Inoltre non sono consentiti cambiamenti nel carico dei singoli veicoli. È lecito adottare il veicolo, quindi, come unità di misura del trasporto merci per i due casi.

La domanda del sistema

La domanda del modello è descritta dai flussi di traffico merci che attraversa il tunnel, per ogni coppia Origine - Destinazione. La costruzione delle matrice O-D è stata condotta integrando i dati concessi da Sitaf S.p.A. [11], relativi al traffico di veicoli pesanti circolanti nella galleria del Fréjus nell'arco della giornata (i dati in fig. 5 si riferiscono al 2003) con quelli di un'indagine condotta agli autotrasportatori, intervistati sul piazzale antistante l'imbocco italiano del traforo del Frejus.

Dal grafico della ripartizione del traffico per fascia oraria osserviamo che tra le 5 e le 12 il traffico di veicoli pesanti è pressoché costante e la variazione nella fascia successiva fino alle 21 non è rilevante (meno del 20%). È possibile quindi analizzare il sistema per l'intera fascia oraria 5-21, con un modello stazionario ed adottare come riferimento per lo studio un intervallo temporale di un'ora. I flussi saranno quindi misurati in veicoli/ora.

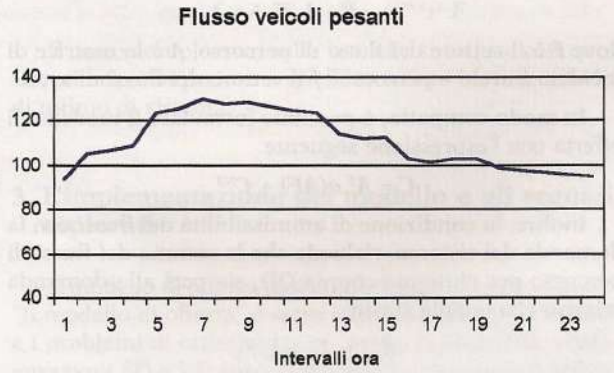

Fig. 5 - Distribuzione giornaliera del traffico veicoli pesanti direzione Francia nella galleria del Fréjus, per fascia oraria (Dati: Sitaf S.p.A.).

La domanda di trasporto merci totale del sistema è costituita dai veicoli pesanti rilevati nella galleria del Fréjus, pari a 125 veicoli ora, corrispondente alla media del flusso nelle fasce orarie di punta.

Un'indagine condotta [12] presso una stazione di servizio prima della galleria (primavera 2004) agli autotrasportatori ha consentito d'individuare le principali zone di O/D dei flussi in transito attraverso il corridoio che collega Torino a Lione [6] . Sono stati intervistati i conducenti che percorrevano l'autostrada; il numero degli intervistati è di poco inferiore al 10% del totale degli autisti in transito. L'intervista è stata ripetuta dopo due mesi e poiché i nuovi risultati non presentavano differenze sostanziali si è deciso di aggregarli per ottenere una stima delle matrici O/D. Le percentuali corrispondenti ad ogni coppia O/D relative alla domanda totale che attraversa la galleria del Fréjus in direzione della Francia sono riportate nella tabella 2.

Come mostrato in tabella esistono altre coppie O-D che usano il traforo, ma non rappresentate nel modello. Tali relazioni sono valutate introducendo alcune ipotesi: i percorsi aventi origine nelle città del sud-est sono considerati come percorsi che partono da Bologna; invece, i percorsi aventi origine nelle città del centro e sud–ovest (principalmente Roma e Napoli) sono considerati come in partenza da Torino. L'ipotesi è che per questi percorsi, piuttosto lunghi, sono necessari due riposi obbligatori, il primo dei quali si suppone nelle città indicate. Seguendo lo stesso approccio, si possono assumere i flussi aventi come destinazione il Regno Unito e i Paesi Bassi come flussi verso Parigi (dove si realizza un riposo di 11 ore prima di proseguire verso la destinazione finale). I flussi corrispondenti ai veicoli verso le regioni del Nord-Ovest della Francia (Pays de la Loire, Normandie e Nord-Pas de Calais) sono stati associati ai flussi per Parigi, ma in questo caso non è necessario il turno di riposo, in quanto le distanze da Parigi (intorno a 200 km) permettono di realizzare l'ultima tratta del trasporto senza superare il limite di ore di guida, tenendo conto dei criteri di flessibilità della normativa vigente nel trasporto stradale, relativa all'uso del cronotachigrafo.

TABELLA 3

MATRICE O/D ESPRESSA IN FLUSSI (Veicoli/ora)

	Lione	Parigi	
Bologna	6	19	25
Milano	10	8	18
Torino	19	41	60
Verona	4	8	12
	39	76	115

TABELLA 2

MATRICE O/D DEL TRAFFICO DI VEICOLI PESANTI PER IL TRASPORTO MERCI PASSANTI PER LA GALLERIA DEL FRÉJUS DIREZIONE FRANCIA (IN PERCENTUALE RISPETTO AL TOTALE DEL FLUSSO).

	Francia									
ORIGINE \ DESTINAZIONE	Centre	Île-de-France	Midi-Pyrénées	Nord-Pas de Calais	Normandie	Pays de la Loire	Rhône-Alpes	Paesi Bassi	Regno Unito	Totale
Abruzzo	-	-	-	1,64%	-	-	-	-	-	**1,64%**
Campania	-	8,20%	-	-	-	1,64%	-	1,64%	1,64%	**13,11%**
Emilia Romagna	-	6,56%	-	-	1,64%	-	3,28%	1,64%	-	**13,11%**
Lazio	-	-	-	-	-	-	1,64%	-	-	**1,64%**
Liguria	-	-	-	-	-	-	-	3,28%	-	**3,28%**
Lombardia	-	1,64%	-	-	1,6 %	1,64%	8,20%	1,64%	-	**14,75%**
Marche	-	-	-	-	1,6 %	-	-	-	-	**1,64%**
Piemonte	1,64%	4,92%	1,64%	4,92%	4,92%	3,28%	13,11%	1,64%	-	**36,07%**
Puglia	-	3,28%	-	-	-	-	1,64%	-	-	**4,92%**
Veneto	-	4,92%	-	1,64%	-	-	3,2 %	-	-	**9,84%**
Totale	**1,64%**	**29,51%**	**1,64%**	**8,20%**	**9,84%**	**6,56%**	**31,15%**	**9,84%**	**1,64%**	**100%**

Gli altri flussi rilevati presso la galleria del Fréjus e con altre origini non sono contemplati nella matrice O-D, in quanto nessuna relazione supera il 4% del totale, ma sono associati al percorso che attraversa la galleria ed influiscono pertanto nella relativa funzione di costo, con un valore di 10 veicoli/ora.

In sintesi, applicando le ipotesi descritte ai dati disponibili e assumendo che tutti gli utenti valutino per la scelta le due alternative, è stata ottenuta la matrice O/D per il modello di rete (tabella 3).

Nella realtà non tutte le aziende sono disponibili

ad utilizzare il servizio combinato per vari motivi: tra quelli dichiarati durante l'indagine svolta si citano la scarsa fiducia nel servizio, la non compatibilità del servizio offerto con la tipologia di merce trasportata, con la sagoma limite ammessa (fig. 1) o, più semplicemente, la non conoscenza dell'alternativa. Questo aspetto può essere introdotto nel modello, ipotizzando un valore percentuale che definisce la quota di utenti ("captive") che decidono in ogni caso di scegliere il tradizionale percorso stradale.

Il modello di offerta

Le indagini preliminari hanno confermato che tra i fattori presi in considerazione dalle aziende nella scelta del percorso, quindi della possibilità di utilizzo del trasporto combinato, vi è in primo luogo il tempo della spedizione, stimato per le varie alternative mediante il modello di rete e per le fasi di trasporto su strada, le soste, i riposi, il tempo eventuale speso a bordo del treno e per le operazioni di trasbordo.

Quando le ore di riposo condizionano la durata totale della spedizione, la scelta del combinato accompagnato risulta più vantaggiosa rispetto alla modalità solamente stradale, in termini di tempo totale del viaggio, quindi solitamente è preferita dalle aziende. La frequenza del servizio di trasporto combinato, espressa in numero di treni/giorno, influisce invece sulla capacità associata all'arco di accesso al servizio e quindi sulla funzione di costo.

Si evidenzia che un aspetto rilevante sulla scelta del trasporto combinato è connesso alla possibilità di trascorrere le ore di riposo, regolate dall'art. 174 del Codice della Strada, a bordo dei vagoni ferroviari, senza interrompere la spedizione. Nel sistema analizzato, la durata del viaggio in treno è troppo breve per essere utilizzata per un turno di riposo, tuttavia consente di ridurre il tempo di guida quindi, per alcune relazioni O-D, di evitare l'attivazione del riposo obbligatorio.

Noti i flussi di ogni coppia O-D e i costi di ogni singolo arco per la rete in esame, mediante il modello di offerta è possibile determinare i flussi sui percorsi, i relativi costi e, di conseguenza, i costi complessivi sulla rete.

Ogni percorso k ha un costo C_k, che è la somma dei costi c_i degli archi che lo costituiscono

$$C_k = \Sigma_i \, a_{ik} \cdot c_i$$

Considerando anche i costi non additivi ed usando la notazione con matrici [4] abbiamo

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{A}^T \; \boldsymbol{c(f)} + \boldsymbol{C}^{NA}$$

dove **C** è il vettore dei costi del percorso, **A** è la matrice d'incidenza archi – percorsi e **c** è il vettore delle funzioni di costo degli archi. $\boldsymbol{C}^{NA}$ sono i costi non additivi, quindi attribuiti solo al percorso e non associabili ad ogni singolo arco (nel caso in esame, le ore di riposo dipendono dalle ore di guida dell'intero percorso).

Allo stesso modo, si possono calcolare, a partire dai flussi di ogni percorso, i flussi di ogni arco

$$\boldsymbol{f} = \boldsymbol{A} \; \boldsymbol{F}$$

dove $\boldsymbol{F}$ è il vettore dei flussi di percorso, $\boldsymbol{A}$ è la matrice di incidenza archi – percorsi e $\boldsymbol{f}$ il vettore dei flussi di arco.

In modo compatto, è possibile formulare il modello di offerta con l'espressione seguente

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{A}^T \, \boldsymbol{c(AF)} + \boldsymbol{C}^{NA}$$

Inoltre, la condizione di ammissibilità dei flussi con la domanda del sistema, richiede che la somma dei flussi di percorso per ciascuna coppia OD, sia pari alla domanda relativa alla coppia stessa

$$d_{OD} = \Sigma_{k \in I(OD)} \, F_k$$

L'interazione domanda – offerta

Il modello di offerta così definito descrive le relazioni tra le grandezze (costi e flussi) relative agli elementi della rete (archi e percorsi). La ripartizione degli utenti nella rete può essere simulata, mediante tale modello, con riferimento a due configurazioni alternative che riflettono due ipotesi di comportamento differente, note in letteratura come Ottimo di Sistema ed Equilibrio per l'Utente. In questo contesto, per utente s'intende chi usa la rete di trasporto ed è responsabile delle scelte di viaggio. Per il soggetto responsabile della pianificazione o della gestione delle infrastrutture la configurazione di maggiore interesse è quella di "ottimo di sistema", che ipotizza un comportamento "cooperativo" fra gli utenti tale da rendere minimo il valore complessivo del costo di tutti coloro che usano il sistema.

Tale valore, noto in letteratura come *costo totale della rete*, può essere definito come la somma dei prodotti tra i costi e i flussi valutati su ogni arco o, come nella relazione riportata di seguito, su ciascun percorso della rete

$$Z = \Sigma_k \, C_k \, F_k$$

In questo caso quindi, minimizzando Z, otteniamo la distribuzione dei flussi che rappresenta l'ottimo di sistema. In questa configurazione, il costo sulla rete è minimo, ma non è garantito che il percorso associato a ciascun utente sia quello di costo minimo.

Nella realtà, l'utente non decide in termini di ottimizzazione globale, ma prevalentemente in funzione del suo costo, ovvero, sceglie il percorso percepito con il costo più basso. Al tal fine, considerando le scelte individuali dei singoli operatori del trasporto merce, sarà valutata anche la ripartizione degli utenti fra i due servizi, sulla base della configurazione di "equilibrio per l'utente".

L'equilibrio per l'utente rappresenta quindi la situazione che la rete raggiunge secondo il I principio di Wardrop, corrispondente alla configurazione dei flussi sulla rete secondo cui nessun utente può migliorare il costo del viaggio cambiando unilateralmente percorso.

In questo caso, la funzione da minimizzare, in presenza dei costi non additivi [4] è la seguente

$$z(f,Y) = \Sigma_i \int_0^{f_i} c_i(x_i) \, dx_i + Y$$

$$con\ \boldsymbol{f} = \boldsymbol{A}\ \boldsymbol{F}\ \ e\ \ \boldsymbol{Y} = (\boldsymbol{C}^{NA})^T\ \boldsymbol{F}$$

Il costo complessivo sulla rete che si ottiene con questo criterio è superiore a quello ottenuto con il criterio di ottimo di sistema.

3. L'implementazione del modello e gli scenari esplorati

Il modello di offerta così come descritto nel paragrafo "Il modello di offerta" è stato implementato in MS Excel e i problemi di ottimizzazione per la ricerca delle configurazioni SO e UE sono stati risolti utilizzando il Solver disponibile nello stesso ambiente. Le variabili di decisione del problema di ottimizzazione sono i flussi sui percorsi, i vincoli descrivono la compatibilità dei flussi sulla rete con la domanda e le funzioni obiettivo da minimizzare sono quelle descritte nel paragrafo 1.

Le ipotesi sulle funzioni di costo

In generale i principali costi percepiti dagli operatori del trasporto merci sono di tipo monetario e di tempo. I primi corrispondono ai costi del personale, delle operazioni di carico e scarico, del carburante, dei pedaggi (stradali e ferroviari), della manutenzione, ecc. Tali costi non saranno considerati perché quelli fissi sono applicabili ad entrambe le scelte e quelli variabili sono influenzati dalla tariffa scelta per il servizio AFA. Poiché tra le politiche di marketing del gestore del servizio di trasporto combinato prevale quella di applicare una tariffa in funzione dei costi dell'alternativa stradale, al fine di rendere neutra la scelta dal punto di vista monetario, in questa fase della ricerca i costi monetari non saranno valutati.

Le componenti di tempo sono misurate in ore e calcolate con riferimento sia ai singoli archi della rete sia ai percorsi. Le funzioni di costo, specifiche degli archi, dipendono dalla capacità delle infrastrutture e dal flusso dei veicoli che le utilizzano. Per i collegamenti fra i nodi delle città, è stato previsto che le infrastrutture stradali siano mediamente congestionate e che i flussi del modello non influenzino il consueto livello di saturazione, stimato direttamente attraverso la velocità commerciale. È stato ipotizzato, sulla base dell'esperienza diffusa, che le velocità commerciali siano pari a 70 km/h, per i collegamenti principali.

$$t_{ij} = d_{ij} / v_{ij}$$

dove t_{ij} è il tempo dell'arco, d_{ij} la distanza tra il nodo i e il nodo j e v_{ij} la velocità commerciale dei veicoli pesanti sull'arco. Le velocità commerciali sono stimate in funzione delle infrastrutture stradali e di altri fattori, come le soste, le eventuali code alle entrate e uscite delle autostrade. Per il tratto metropolitano tra Torino ed Orbassano, che comprende anche una tratta di tangenziale, la velocità commerciale è stata assunta più bassa rispetto al valore precedente e pari a 50 km/h.

L'altro arco stradale che potrebbe avere dei problemi di saturazione è la galleria del Fréjus, a causa dei controlli eseguiti, alquanto precisi, per la presenza di un portale termografico. La funzione di costo per questo arco è calcolata nel modo seguente

$$t_{guida} = t_{attesa} + t_{galleria}$$

Il tempo di attraversamento della galleria $t_{galleria}$ dall'uscita del portale termico all'uscita della galleria, lato francese, è calcolato costante, assumendo[5] una velocità commerciale media di 30 km/h.

Per il tempo di attesa dovuto ai controlli t_{attesa} è stata assunta una funzione continua, formulata a partire dalla teoria delle code (ipotesi di sistema M/M/1) che corrisponde al tempo medio che il veicolo attende prima di accedere alla galleria, tenendo conto dei tempi necessari per la coda, il pagamento del pedaggio e i controlli di sicurezza nel portale termico. Poiché la funzione ottenuta a partire dalla teoria delle code presenta un asintoto nel punto nel quale il flusso è uguale alla capacità, per rendere questa funzione continua in tutti i punti, si sostituisce la retta tangente in un punto vicino all'asintoto (nel nostro caso, $f = 0{,}98C$). Tenendo conto della distribuzione del traffico nelle fasce orarie considerate ed ipotizzando una disciplina della coda del tipo M/M/1, con primo arrivato - primo servito, si ottiene

$$t_{attesa+controlli} = \frac{1}{C - f}$$

Sulla base dei dati disponibili è stato stimato un tempo medio per i controlli al portale, comprese le operazioni di pagamento del pedaggio, entrata e uscita dal portale, pari a 30 secondi. Questo valore permette di calcolare la capacità del portale termico, $C_{portale} = 120$ veicoli/ora. In questo caso, la capacità della galleria è normalmente condizionata da quella del portale.

Nella rete vi sono altri due archi che potrebbero andare in saturazione a causa dei flussi del modello. Per il trasporto su rotaia fra Orbassano e Aiton, sono definiti tre archi: quello centrale rappresenta il percorso in treno, con un tempo di percorrenza assunto costante, sulla base dell'orario del programmato (3h e 15min). Le fasi di carico e lo scarico del treno sono rappresentate da due archi le cui funzioni di costo sono definite dalla seguente funzione continua di forma esponenziale

$$t = t_0 + \alpha \cdot \left(\frac{f}{C}\right)^{\beta}$$

[5] Nel caso di un aumento della sicurezza, questa funzione di costo può essere modificata in due modi. Il primo è l'aggiunta di un tempo corrispondente ad ulteriori misure di sicurezza dopo il passaggio dal portale termico o all'attesa dei veicoli per entrare nella galleria per garantire una distanza di separazione tra i veicoli superiore a quella attuale; il secondo è la diminuzione della velocità commerciale dei veicoli all'interno della galleria. In ambedue le situazioni, la capacità della galleria viene limitata.

dove

t = tempo d'attesa del veicolo in fase di carico;

t_0 = tempo d'attesa del veicolo in fase di carico, in assenza di congestione;

f = flusso di arrivo alla stazione;

C = Capacità di carico del treno.

Poiché il servizio di autostrada viaggiante prevede la prenotazione dei posti, è assunto che l'utente conosca con sufficiente anticipo le disponibilità del treno. Il tempo necessario a tutte le operazioni che precedono la partenza del treno è di 41 minuti. Inoltre, le caratteristiche dei terminal Modalohr permettono di realizzare le operazioni di carico o scarico dei veicoli simultaneamente, quindi il servizio non presenta situazioni di coda significative. Sono stati determinati i parametri α e β a partire da queste ipotesi, ottenendo una funzione di costo che nel tratto iniziale cresce molto lentamente fino alla capacità e poi fornisce tempi così elevati da scoraggiare l'uso del treno, quando è saturo.

Si ipotizza, inoltre, che il trasporto combinato nel modello sia tutto accompagnato. La capacità del treno sarà quindi di 2 veicoli ogni 3 vasche di carico, perché ogni vasca può trasportare un semirimorchio o due motrici stradali [9]. Attualmente, i treni sono composti di 14 carri doppi per il trasporto di veicoli stradali, quindi la capacità di questi treni sarà di 18 veicoli/treno. La capacità del servizio, espressa in veicoli/ora, è ottenuta dividendo il numero di veicoli che il servizio è in grado di trasportare nel periodo di analisi per la durata del periodo stesso.

Le ipotesi sui costi non additivi

Il tempo della spedizione, come già anticipato, è composto anche dai tempi dovuti al riposo che dipendono dalle ore di guida lungo il percorso; pertanto, esso è un costo non additivo che assume un valore pari alla durata del riposo obbligatorio (11 ore) quando il tempo di guida supera le 9 ore. Si osserva che per il modello di rete i tempi di guida delle spedizioni non superano le 18 ore e si prevede al massimo un riposo per spedizione.

Nel caso del trasporto combinato, quando i conducenti dei veicoli stradali sono a bordo del treno, ma non alla guida dei veicoli, le ore non sono considerate di guida. Il tempo impiegato per il carico e lo scarico dei treni, invece, contribuisce ad aumentare le ore di guida, perché queste operazioni si realizzano con l'aiuto del conducente, ma nel modello si ipotizza che i possibili ritardi non alterino l'attivazione del periodo di riposo preventivato[6] dai conducenti.

La stessa ipotesi è stata assunta per i tempi d'attesa prima della galleria del Fréjus. Essi sono normalmente inferiori a un'ora e, tenendo conto della flessibilità della normativa sui riposi per i conducenti di veicoli pesanti, è lecito assumere che i costi non additivi, dovuti ai riposi, siano indipendenti dei flussi.

Gli scenari esplorati

Lo scenario di riferimento usato per i confronti descrive la situazione con l'attuale servizio AFA. La frequenza del servizio di autostrada viaggiante è attualmente di 4 treni al giorno, con una capacità di 18 veicoli/treno. Le altre caratteristiche sono definite nei paragrafi precedenti. A partire da questo scenario, sono state realizzate analisi diverse per studiare gli effetti sulle prestazioni del servizio di autostrada viaggiante dei seguenti fattori.

Quota di domanda disponibile. La disponibilità a prendere in considerazione l'alternativa del trasporto combinato non coinvolge il totale della domanda, ma solo una parte. Gli effetti di questo fattore, influenzato dalle caratteristiche del servizio (sagome ammissibili) e da politiche di marketing (promozione e politica tariffaria) si ripercuotono sul funzionamento del sistema. Nel modello è stato ipotizzato che la quota della domanda disponibile a valutare la scelta sia costante per tutte le coppie O-D.

Frequenza dei treni. Attualmente il servizio di Autostrada Ferroviaria Alpina ha una frequenza di 4 treni/giorno, di conseguenza una capacità molto inferiore a quella della galleria del Fréjus. Negli scenari saranno realizzate diverse simulazioni aumentando le frequenze dei treni fino ad un valore di 1 treno/ora.

Sicurezza. Un ulteriore fattore valutato è l'aumento delle misure di sicurezza nella galleria del Fréjus. In questo caso, il servizio di trasporto combinato è valorizzato indirettamente in quanto la capacità della galleria diminuisce per le misure di sicurezza al portale termografico.

Lunghezza dei treni. Attualmente i treni per il trasporto merci hanno una lunghezza di 550 m, ma l'Unione Europea già prevede aumenti fino a 750 m per incrementarne la capacità. Alcuni studi analizzano, inoltre le possibilità di aumentare le lunghezze dei treni, ipotizzando di raddoppiarle.

4. Risultati ottenuti e osservazioni

Si presentano di seguito alcuni dei risultati significativi con riferimento agli scenari di analisi dello stato attuale, con gli effetti causati da un aumento della quota di domanda disponibile e di possibili evoluzioni del servizio di trasporto ferroviario con incrementi di frequenza e lunghezza. Infine, si riportano i risultati di scenari in cui si valuta la possibilità d'incrementare i tempi necessari per il controllo all'ingresso del tunnel.

[6] La normativa di riferimento (art. 174 C.d.S. e Regolamento europeo del 20 dicembre 1985 n°3820) prevede, infatti, alcuni criteri di flessibilità che consentono ai conducenti di adeguare i periodi di riposo sulla base delle proprie esigenze.

TABELLA 4

USO DEL SERVIZIO COMBINATO - OFFERTA ATTUALE: INDICE DI SATURAZIONE

	SO			UE		
	Quota di domanda disponibile					
	10 %	*20 %*	*30 %*	*10 %*	*20 %*	*30 %*
Indice di saturazione del treno	*96%*	*100%*	*100%*	*74%*	*91%*	*80%*

TABELLA 5

USO DEL SERVIZIO COMBINATO OFFERTA ATTUALE: RIPARTIZIONE FRA LE COPPIE OD

	SO			UE		
	Quota di domanda disponibile					
	10 %	*20 %*	*30 %*	*10 %*	*20 %*	*30 %*
	Flussi sul treno (veicoli/ora)					
Verona - Lione	0,4	0,8	1,6	0.4	0.8	1.6
Verona - Parigi	0,1	0,0	0,0	0.4	0.0	0.0
Bologna - Lione	0,6	0,8	2,4	0.6	1.2	2.4
Bologna - Parigi	0,7	0,0	0,0	0.0	0.2	0.0
Milano - Lione	0,1	0,0	0,0	0.4	0.0	0.0
Milano - Parigi	0,1	0,0	0,0	0.4	0.0	0.0
Torino - Lione	0,7	0,6	0,0	0.0	0.2	0.0
Torino - Parigi	2,0	2,8	1,0	1.5	2.2	0.0

Stato attuale e aumento di quota di domanda disponibile

Al fine di esplorare gli effetti di un aumento di utenti che vengono a conoscenza del servizio o che sono nelle condizioni di utilizzarlo, sono stati analizzati degli scenari con incremento della quota di domanda disponibile. Per confrontare i risultati delle diverse configurazioni è stato scelto come scenario di riferimento lo stato attuale: un servizio di autostrada viaggiante con treni di lunghezza 550 m (14 carri) e una frequenza di 4 treni/giorno. La capacità della galleria è anch'essa quella in condizioni di normale utilizzo e pari a 125 veicoli/ora. Si riportano alcuni risultati di maggior interesse relativi all'uso del servizio di trasporto combinato dalle varie coppie O-D.

Si osserva che il sistema (sia il servizio di trasporto combinato che la galleria del Fréjus) è al limite della capacità (tabelle 4 e 5). Essendo la capacità del treno molto piccola, per percentuali di utenti superiori al 40% il sistema è instabile per cui si esplorano solo i valori inferiori. Le coppie O-D che sono più attratte dal treno sono Bologna-Lione e Verona-Lione, dove nel trasporto tutto strada si deve realizzare il riposo obbligatorio di 11 ore, mentre sul treno il tempo di guida è inferiore alle 9 ore (infatti il periodo in cui il conducente è sul treno non è considerato tempo di guida). L'altra coppia con interessi verso il servizio combinato è la Torino-Parigi. Il modello riproduce per i vari scenari il fenomeno seguente: quando la quota di domanda disponibile è bassa, le coppie con vantaggio lasciano un margine di capacità anche alle altre coppie, che usano il servizio anche perché la galleria è satura; con l'incremento della quota disponibile, le coppie favorite saturano il servizio combinato, favorendo la scelta alternativa per le altre coppie. In tutti i casi si conferma che l'uso spontaneo del treno (UE), misurato mediante l'indice di saturazione (rapporto fra flusso e capacità) è inferiore a quello corrispondente all'ottimo di sistema (SO).

Aumento di frequenza o lunghezza dei treni

Alla luce delle previsioni di sviluppo del servizio, con frequenza pari a 10 treni al giorno prevista a partire dal 2007, è stato valutato l'uso del servizio in diverse condizioni della quota di domanda disponibile. Per valori bassi, infatti, il servizio di trasporto combinato è attrattivo per la maggior parte delle coppie O-D, perché il flusso delle coppie favorite non è tale da rendere la galleria più conveniente, per cui alcuni utenti di altre coppie prendono il servizio combinato. Se la quota aumenta di poco (da 10% al 20%), si osserva un incremento dell'uso, causato dalle coppie O-D che non presentano il vantaggio a priori. Quando la quota aumenta oltre tale valore, si osserva una diminuzione nell'uso spontaneo del servizio, spiegabile dall'incremento di uso delle coppie favorite (fig. 6). Tale fenomeno è attenuato se si considera la configurazione di Ottimo di Sistema (fig. 7).

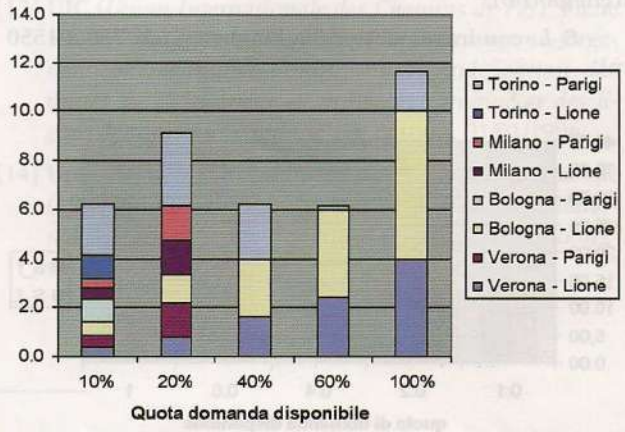

Fig. 6 - Distribuzione dei flussi nel servizio Autostrade Ferroviarie Alpine (UE).

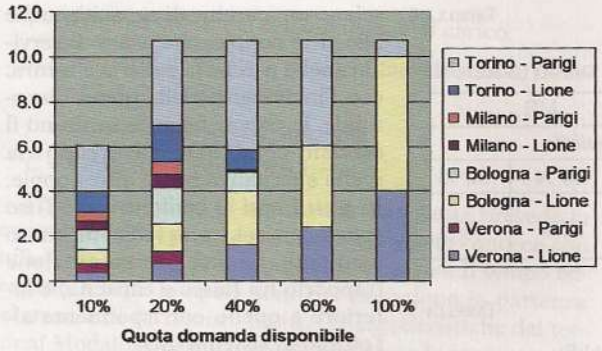

Fig. 7 - Distribuzione dei flussi nel servizio Autostrade Ferroviarie Alpine (SO).

I diagrammi mostrati nelle figure sono relativi ad una frequenza pari a 10 treni al giorno e lunghezza di 550m, ma possono essere letti con riferimento ad un servizio con una frequenza di 4 treni al giorno con lunghezza di circa 1300m.

L'aumento di sicurezza al tunnel

Nel caso in cui ci sia disponibilità di offerta (treno con alta frequenza o lunghezza elevata) e la domanda non sia tale da saturare la capacità, è possibile esplorare scenari in cui il traffico stradale sia penalizzato da aumenti di sicurezza per controlli al tunnel (ad esempio tempi incrementati del 20% e quindi valore di capacità pari a 100 veic/h).

Un primo caso è rappresentato dall'offerta di servizio combinato con frequenza di 10 treni/giorno e lunghezza pari a 750m che mostra la saturazione del treno e del tunnel con comportamento instabile del sistema. Si esplorano pertanto due scenari nei quali potrebbe essere ammissibile l'aumento dei tempi per i controlli al tunnel:

- *S_f*, con aumento della frequenza (da 10 a 14 treni/giorno);

- *S_L* con incremento della lunghezza (da 750 a 1550 m).

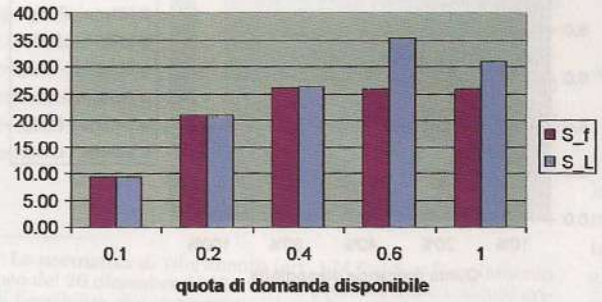

Fig. 8 - Uso del servizio AFA (maggiore sicurezza al tunnel) - Configurazione UE.

Nello scenario *S_f* l'uso del treno è quasi pari alla capacità (25 veic/h) già con il 40% della quota di domanda disponibile e il comportamento del sistema al tunnel è stabile anche con l'intera domanda disponibile (fig. 8). Lo scenario *S_L* mostra invece un margine di capacità inutilizzato fino a quando la quota di domanda disponibile non raggiunge il 60%, dove si osserva il massimo utilizzo (l'indice di saturazione del servizio è circa all'86%).

5. Conclusioni

In questa ricerca è stata valutata, mediante l'adozione di un modello di rete, l'influenza delle caratteristiche del sistema di offerta, relativo al transito alpino tra l'Italia e la Francia, sulla ripartizione del trasporto merci. È stato analizzato, in particolare, un nuovo servizio di trasporto combinato disponibile e si è voluto stimare se e quanto le sue caratteristiche siano in grado di influenzare la scelta operata da parte delle aziende di trasporto merci, rispetto al tradizionale percorso stradale attraverso il tunnel del Frejus.

Il sistema è riprodotto ed analizzato mediante un modello di rete che considera in modo esplicito il fenomeno della congestione nelle parti significative del sistema e riproduce pertanto quei fenomeni di interazione tra i flussi dei percorsi sulla rete. Nel modello proposto, il costo monetario non influisce sulla ripartizione modale in quanto si è assunto che il gestore del servizio adegui il prezzo sulla base dei costi del trasporto stradale, in modo da rendere neutrale la scelta. La frequenza del servizio combinato è introdotta mediante l'utilizzo di una funzione di costo continua, associata all'arco di accesso al servizio.

La dispersione del comportamento del decisore nella scelta è stata assunta trascurabile e si è adottato pertanto un modello deterministico. Poiché nella realtà, inoltre, non tutte le aziende sono disponibili ad utilizzare il servizio combinato, perché ad esempio non compatibile con la merce trasportata, è stato introdotto un valore percentuale che definisce la quota di utenti disponibili ad effettuare la scelta, assumendo costante la domanda totale.

L'utilizzo del sistema è stato valutato in una configurazione di "ottimo di sistema", che rende minimi i costi sulla rete, e di "equilibrio per l'utente", al fine di stimare le scelte spontanee degli operatori di trasporto merci. Il servizio è stato esplorato, nello stato attuale, in relazione ad incrementi della quota di domanda disponibile ed in alcune ipotesi d'incremento della capacità del servizio ferroviario, sia in termini di frequenza che di lunghezza dei treni. In tali condizioni, poiché si rende disponibile un margine di capacità per il servizio combinato, sono state valutate le conseguenze di aumenti dei tempi per i controlli al tunnel, sulle scelte degli operatori.

I risultati degli scenari esplorati evidenziano la capacità del modello di riprodurre quei fenomeni di interazione tra i flussi di percorsi che si verificano sulla rete in pre-

senza di congestione. Il servizio di autostrada viaggiante analizzato, come prevedibile, risulta più scelto per le relazioni nelle quali c'è un vantaggio nel tempo di percorrenza, dovuto ai recuperi del tempo di riposo. Al contrario, per le relazioni senza vantaggio a priori, si stima una quota di utilizzo che dipende dai diversi fattori considerati nel modello di rete.

Lo scenario in cui si valuta l'incremento di lunghezza dei treni e l'aumento di sicurezza al tunnel mostra che la capacità offerta è utilizzata in modo crescente all'aumentare della diffusione del servizio fra gli utenti (fino a quando la quota di domanda disponibile raggiunge il 60%) ma, a causa dell'interazione fra le coppie O-D con caratteristiche diverse, quando tutta la domanda può scegliere, si osserva un utilizzo inferiore.

Sviluppi futuri della ricerca prevedono, infine, di applicare il modello, con opportune estensioni della rete, al fine di esplorare ulteriori scenari che coinvolgano variazioni strutturali dell'offerta di trasporto ferroviario, quali ad esempio nuove localizzazioni di terminal per il servizio combinato.

BIBLIOGRAFIA

[1] Abdelwahab W. M. (1998) *"Elasticities of mode choice probabilities and market elasticities of demand: Evidence from a simultaneous mode choice/shipment-size freight transport model"*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review Volume: 34, Issue: 4, December, 1998, pp. 257-266.

[2] Beuthe M., Jourquin B., Geerts J.F., Koul à Ndjang' Ha C. (2001) *"Freight transportation demand elasticities: a geographic multimodal transportation network analysis"*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review Volume: 37, Issue: 4, August, 2001, pp. 253-266.

[3] Biggiero L., Russo F. (1997) *"Il progetto di una indagine combinata RP-SP per la calibrazione congiunta di modelli di domanda intercity passeggeri e merci"*. In "Il trasporto pubblico nei sistemi urbani e metropolitani", a cura di S. Amoroso e A. Crotti, (Atti del Seminario SIDT, Torino 1995). Franco Angeli, Milano.

[4] Cascetta E. (1998) *Teoria e Metodi dell'ingegneria dei sistemi di trasporto* (UTET).

[5] Commission of the European Communities, *"White paper – European transport Policy for 2010: time to decide"*, COM(2001) 270 final, Brussels, September 2001.

[6] Crotti A., Dalla Chiara B., Deflorio F., Mascia M., *"L'autostrada ferroviaria alpina tra Italia e Francia: modellizzazione della scelta modale"*, memoria presentata al XII Convegno nazionale SIDT e seminario 2004 Università degli Studi di Roma "La Sapienza", 24 settembre 2004.

[7] Cullinane K., et al. (2000) *"Identifying influential attributes in freight route/mode choice decisions: a content analysis"*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review Volume: 36, Issue: 1, March, 2000, pp. 41-53.

[8] Dalla Chiara B., Marigo D., Curcu G. (2003) *"Trasporto combinato accompagnato: caratteristiche e innovazioni"* Trasporti e Territorio, n. 2, pp 48-63, giugno 2003

[9] Elia F. (2004) *"Prestazioni di veicoli per il trasporto combinato - accompagnato: confronto fra carri ultrabassi e carri con carrelli ordinari"*; Tesi di laurea, relatori: B. Dalla Chiara, G. Curti.

[10] Massa R., Trevisan P. (1995) *"Autostrada ferroviaria: linea a grande sagoma riservata agli automezzi pesanti"*, Ingegneria Ferroviaria n. 1-2, pp. 23-34, gennaio - febbraio 1995.

[11] Massari E. (2003) *"Lo sviluppo di sistemi di trasporto combinato accompagnato: valutazione degli effetti del nuovo servizio tra l'Italia e la Francia"*; Tesi di laurea, relatore B. Dalla Chiara.

[12] Spione G., *"Analisi e quantificazione dei fattori che influenzano la scelta modale nei servizi di trasporto combinato accompagnato"*, Tesi di laurea, relatore: B. Dalla Chiara, co-relatori F. Deflorio, M. Mascia; luglio 2004.

[13] UIC (*Union Internationale des Chemins de Fer*), Fiche 596-6, *"Trafic de véhicules routiers sur wagons–Organisation technique–Conditions de codification des unités de chargement en transport combiné et des lignes de transport combiné"*, 3e édition, 01/01/1996.

[14] United Nations - Economic Commission for Europe (1999), *"European Agreement on important international combined transport lines and related installations"* (AGTC), Geneva (CH).