POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Treni ad assetto variabile e tradizionali: prestazioni cinematiche ed analisi di comfort per l’ottimizzazione della compensazione

Original
Treni ad assetto variabile e tradizionali: prestazioni cinematiche ed analisi di comfort per l’ottimizzazione della compensazione / Candela, F; DALLA CHIARA, Bruno; Devecchi, D.. - In: INGEGNERIA FERROVIARIA. - ISSN 0020-0956. - 3, anno LX:(2005), pp. 221-234.

Availability:
This version is available at: 11583/1629904 since:

Publisher:
CIFI

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)

17 April 2024

Treni ad assetto variabile e tradizionali: prestazioni cinematiche ed analisi di comfort per l'ottimizzazione della compensazione

Dott. Ing. Fabio CANDELA, Prof. Ing. Bruno DALLA CHIARA(*), Dott. Ing. Dante DEVECCHI(**)

SOMMARIO – L'articolo riguarda treni ad assetto variabile e tradizionali, per i quali sono confrontate le prestazioni cinematiche ed il comfort percepito a bordo. I treni ad assetto variabile consentono maggiori velocità in curva rispetto a quelli tradizionali tuttavia i movimenti di rollio, più accentuati, possono – talvolta - influire negativamente sul comfort percepito dai passeggeri. Nell'articolo, il comfort è affrontato in merito a due aspetti: la cinetosi (indici MSDV e MDRA) ed il disagio provato dai passeggeri nelle fasi di percorrenza dei raccordi tra rettilineo e curva (indice P_{CT}). Scopo ultimo dell'articolo è l'analisi dell'ottimizzazione della percentuale di compensazione, al fine di realizzare un treno ad assetto variabile veloce e contestualmente confortevole, arrivando anche ad ipotizzare un sistema di variazione dell'assetto cassa di tipo anticipativo.

Introduzione

Un aspetto di rilevante importanza nell'attuale ricerca in ambito ferroviario riguarda il comfort dei viaggiatori a bordo di un veicolo, in particolare se ad assetto variabile: a fronte di un incremento della velocità di percorrenza su tracciati tradizionali, i sistemi ad assetto variabile introducono, a causa dei sistemi attivi di compensazione, movimenti aggiuntivi di rollio della cassa a quelli che nei treni tradizionali sono imputabili ai raccordi di transizione ed alla cedevolezza delle sospensioni primarie e secondarie.

Le necessità, tecniche e costruttive, di realizzare un treno veloce e contemporaneamente ad elevato livello di comfort possono apparire in contrasto: incrementi di velocità su linee tradizionali caratterizzate da raggi di curvatura non elevati provocano accelerazioni laterali, che debbono essere ridotte sui passeggeri, mediante dispositivi di variazione d'assetto, ma che possono, in alcuni casi, pregiudicare il comfort percepito dai passeggeri stessi.

Nel lavoro trattato dal presente articolo, il comfort è affrontato in due aspetti: la cinetosi ed il comfort di marcia propriamente detto, ossia il disagio provato dai passeggeri quando il treno percorre i raccordi che, dal binario rettilineo, introducono alla piena curva; questo aspetto del comfort viene valutato mediante l'indice P_{CT}, oltre introdotto.

Per comprendere inoltre come la tipologia del treno influenzi le prestazioni cinematiche, in termine di orario e di velocità commerciale, sono state effettuate diverse simulazioni considerando due treni ad assetto variabile dotati di differente equipaggiamento di trazione, rispettivamente con motori da 550 kW e da 700 kW, ed un treno tradizionale di tipo Intercity. Il confronto tra le prestazioni cinematiche dei diversi treni permette:

- di apprezzare i diversi tempi di percorrenza delle tratte considerate (un treno ad assetto variabile può arrivare a garantire una velocità commerciale del 20-30% più elevata rispetto ad uno tradizionale);

- di calcolare lo sforzo di trazione utilizzato, dato particolarmente importante poiché, a partire da esso, vengono dimensionati a fatica tutti gli elementi della trasmissione;

- di calcolare le percentuali di funzionamento e di sfruttamento del motore.

In una seconda parte sono riportati i risultati delle analisi del comfort rilevato durante le simulazioni al computer per le diverse tipologie di treno. Sono stati utilizzati l'indice P_{CT} per la determinazione del comfort sui transitori di ingresso e gli indici MSDV e MDRA (rispettivamente acronimi di *Motion Sickness Dose Value* e *Motion Dose Roll Acceleration*) per la cinetosi.

Si è inoltre determinata la percentuale di compensazione più adatta ad ottimizzare il funzionamento del sistema di assetto cassa sulla base del comfort a bordo; le

(*) Politecnico di Torino, Dipartimento DITIC – Trasporti.

(**) Alstom Ferroviaria, Savigliano.

prestazioni cinematiche non vengono influenzate dalla scelta. Sono state condotte simulazioni con percentuali di compensazione diversa dalla tradizionale e sono stati confrontati i risultati ottenuti. Viene infine proposto un modello semplice di valutazione della cinetosi, basato sui dati ottenuti con prove sperimentali da vari enti, che riesca a considerare sia l'effetto delle accelerazioni laterali residue in cassa (grandezza considerata nell'indice MSDV), sia l'accelerazione angolare dovuta a rollio (elemento privilegiato dall'indice MDRA).

TABELLA 1

CARATTERISTICHE TECNICHE DEI TRENI A CONFRONTO

	Pendolino 700 kW	Pendolino 550 kW	Intercity
Potenza totale [MW]	5.6	4.4	4.4
Rapporto di trasmissione	2.269	2.5	2.5
Rendimento della trasmissione	0.98	0.975	0.975
Peso totale convoglio [N]	4.218.300 (*)	3.973.050	4.150.022
Peso totale su ruote motrici [N]	1205227	1135154	863280 (**)
Peso totale su ruote frenate [N]	4218300	3973050	4150022 (***)
Massa totale equivalente [kg]	45275	44184	45000
Area frontale veicolo del testa [m^2]	8.7884	8.7884	9.0000
Coefficiente di rotolamento [-]	$2.473 \cdot 10^{-3}$	$2.473 \cdot 10^{-3}$	$2.473 \cdot 10^{-3}$
Coefficiente di penetrazione aerodinamica [$kg/(m^2m^2s^{-2})$]	0.0894	0.0894	0.1102

(*) Valore assunto come ipotesi
(**) Ipotesi locomotiva a quattro assi con massa di 22 t/asse
(***) Considerate sette carrozze con massa di 10.5 t/asse più 80 kg/passeggero

1. Confronto tra prestazioni cinematiche

Le simulazioni condotte hanno riguardato tre tipologie di treni: due ad assetto variabile ed un *Intercity*. I due

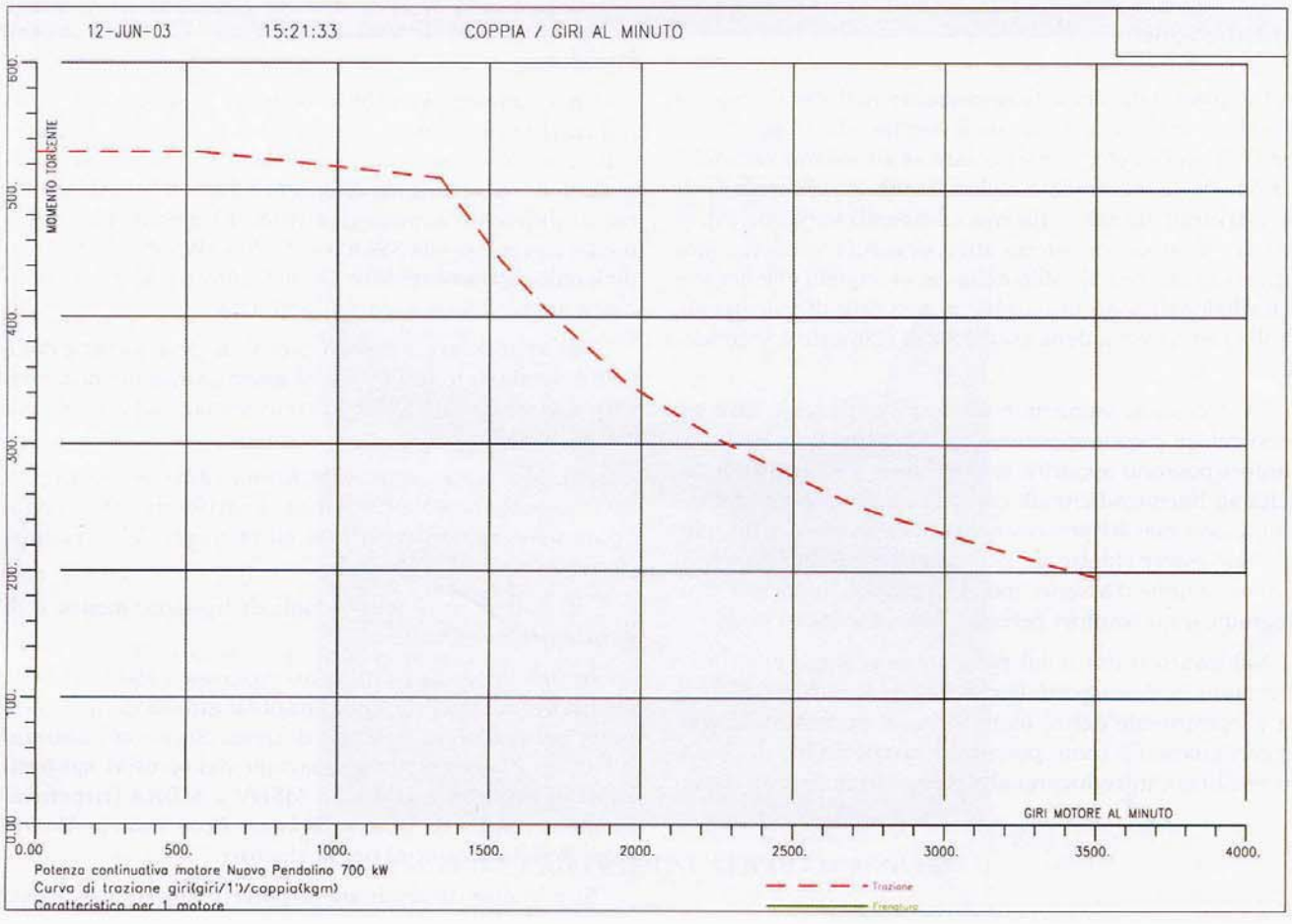

Fig. 1 - Curva caratteristica del Pendolino con motorizzazione da 700kW.

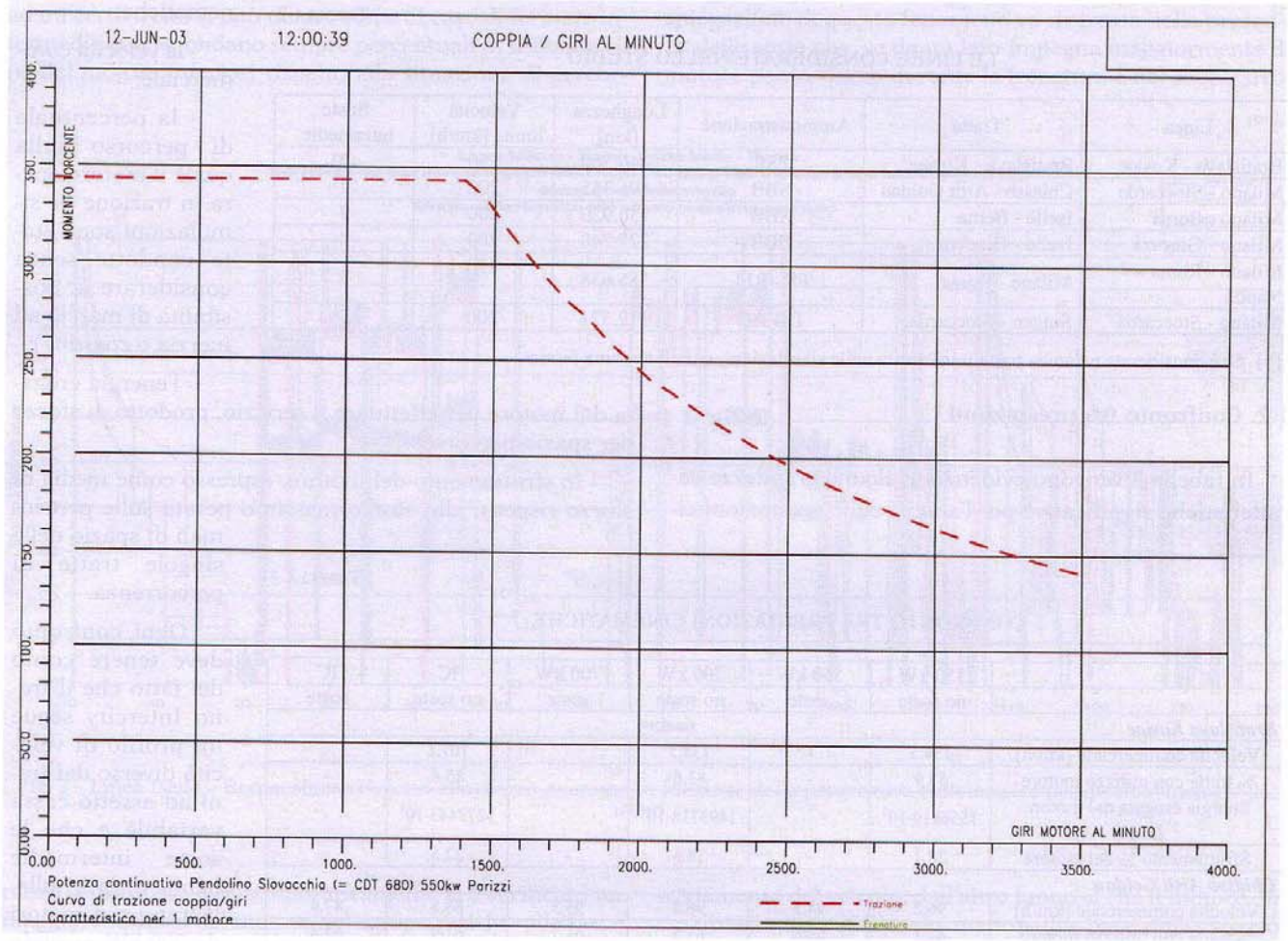

Fig. 2 - Curva caratteristica per Pendolino con motorizzazione da 550kW.

treni ad assetto variabile sono Pendolini, distinti sulla base della potenza del singolo motore: quello identificato con 550 kW rappresenta il veicolo prodotto fino al 2004 in larga scala mentre il 700 kW costituisce il progetto del Nuovo Pendolino. Le caratteristiche tecniche distintive dei vari treni sono riportate nella tabella 1.

Le curve caratteristiche dei due treni ad assetto variabile sono riportate in figura 1 (Pendolino con motorizzazioni da 700kW) e figura 2 (Pendolino con motorizzazioni da 550 kW).

1.1. Le linee

Sono state scelte innanzitutto con attenzione le linee da prendere in esame, che costituiscono un obiettivo dell'utilizzo reale del treno. Le linee significative sono state individuate tra quelle appartenenti alle diverse Amministrazioni ferroviarie europee. Un prospetto delle linee con relative caratteristiche è riportato in tabella 2[1].

Sono state scelte alcune tratte particolarmente impegnative per l'utilizzo del motore, quali quelle appartenenti alla rete SBB: la Iselle-Berna comprende il valico del Sempione e del Lötschberg, la Chiasso-Arth Goldau, il valico del Gottardo, la Iselle-Ginevra il valico del Sempione. La tratta Milano-Roma comprende invece il tratto di Direttissima Firenze-Roma. Le simulazioni hanno previsto per ogni tratta la percorrenza con e senza soste intermedie, di durata nulla.

[1] Le linee in questione sono linee tradizionali, ad eccezione della direttissima Firenze-Roma, all'interno della tratta Milano-Roma; quindi, in generale, si fa riferimento a raccordi parabolici; in base a [MONTEPARA, GIULIANI, 2002] confrontando le due tipologie di raccordo, parabolici e clotoidi di transizione, «...le differenze riscontrate sono talmente piccole da poterle ritenere intercambiabili con l'unica eccezione del fatto che solo la prima permette di superare, almeno teoricamente, la discontinuità sulla curvatura sul punto di passaggio dal raccordo alla curva circolare».

TABELLA 2

LE LINEE CONSIDERATE NELLO STUDIO

Linea	Tratta	Amministrazione	Lunghezza [km]	Velocità limite [km/h]	Soste intermedie
Bratislava - Kosice	Bratislava - Kosice	ZSR	446.569	230	(*)
Milano - Stoccarda	Chiasso - Arth Goldau	SBB	196.355	200	2
Milano - Berna	Iselle - Berna	SBB	136.920	200	3
Milano - Ginevra	Iselle - Ginevra	SBB	227.740	200	4
Milano - Roma - Napoli	Milano - Roma	FS - RFI	585.638	250	7
Milano - Stoccarda	Singen - Stoccarda	DB AG	172.321	200	3

(*) Si è considerata un'unica tratta ininterrotta nelle simulazioni, quindi nessuna fermata

1.2. Confronto tra prestazioni

In tabella 3 vengono evidenziate alcune grandezze caratteristiche significative per l'analisi delle prestazioni cinematiche:

- la velocità commerciale;
- la percentuale di percorso sulla quale il motore opera in trazione (le simulazioni sono state condotte senza considerare la possibilità di marcia ad inerzia o *coasting*);
- l'energia erogata dal motore per effettuare il servizio, prodotto di sforzo per spazio percorso;
- lo sfruttamento del motore, espresso come media di sforzo rispetto allo sforzo massimo pesata sulle percentuali di spazio delle singole tratte di percorrenza.

TABELLA 3

CONFRONTO TRA PRESTAZIONI CINEMATICHE

	550 kW no soste	550 kW soste	700 kW no soste	700 kW soste	IC no soste	IC soste
Bratislava Kosice						
Velocità commerciale [km/h]	134.5	-	135.3	-	107.1	-
% tratta con utilizzo motore	83.9	-	83.6	-	85.8	-
Energia erogata dal motore [N·m]	$1556819 \cdot 10^4$	-	$1493118 \cdot 10^4$	-	$1273443 \cdot 10^4$	-
Sfruttamento % del motore	28.1	-	18.6	-	22.5	-
Chiasso Arth Goldau						
Velocità commerciale [km/h]	96.2	94.5	96.8	95.3	88.8	87.4
% tratta con utilizzo motore	62.1	62.6	61.5	61.7	61.9	62.4
Energia erogata dal motore [N·m]	$852728 \cdot 10^4$	$886369 \cdot 10^4$	$894653 \cdot 10^4$	$933584 \cdot 10^4$	$767259 \cdot 10^4$	$798725 \cdot 10^4$
Sfruttamento % del motore	47.4	48.9	34.5	35.8	42.8	44.2
Iselle Berna						
Velocità commerciale [km/h]	111.8	107.5	113.8	110.3	96.0	93.3
% tratta con utilizzo motore	87.2	85.6	86.7	84.9	87.8	86.3
Energia erogata dal motore [N·m]	$996815 \cdot 10^4$	$1036337 \cdot 10^4$	$1044007 \cdot 10^4$	$1089248 \cdot 10^4$	$979116 \cdot 10^4$	$1011342 \cdot 10^4$
Sfruttamento % del motore	56.5	59.9	40.9	43.5	55.2	57.9
Iselle Ginevra						
Velocità commerciale [km/h]	152.3	144.1	155.3	148.6	137.0	131.1
% tratta con utilizzo motore	83.2	81.4	81.2	79.1	83.0	81.3
Energia erogata dal motore [N·m]	$1145321 \cdot 10^4$	$1236526 \cdot 10^4$	$1236494 \cdot 10^4$	$1344928 \cdot 10^4$	$1097784 \cdot 10^4$	$1189445 \cdot 10^4$
Sfruttamento % del motore	40.9	45.2	31.1	34.7	39.3	43.5
Milano Roma						
Velocità commerciale [km/h]	174.1	163.2	178.0	168.9	161.1	152.8
% tratta con utilizzo motore	91.0	87.6	90.7	87.0	90.6	87.7
Energia erogata dal motore [N·m]	$2318533 \cdot 10^4$	$2701951 \cdot 10^4$	$2445657 \cdot 10^4$	$2864624 \cdot 10^4$	$2527063 \cdot 10^4$	$2844351 \cdot 10^4$
Sfruttamento % del motore	29.4	35.7	21.4	26.1	32.3	37.5
Singen Stoccarla						
Velocità commerciale [km/h]	117.3	112.4	118.3	114.4	101.7	98.5
% tratta con utilizzo motore	70.1	69.0	69.1	67.7	69.0	68.1
Energia erogata dal motore [N·m]	$656442 \cdot 10^4$	$732049 \cdot 10^4$	$694429 \cdot 10^4$	$774735 \cdot 10^4$	$512606 \cdot 10^4$	$584713 \cdot 10^4$
Sfruttamento % del motore	36.8	41.7	27.1	30.9	29.2	33.7

Ogni confronto deve tenere conto del fatto che il treno Intercity segue un profilo di velocità diverso dai treni ad assetto cassa variabile e che le soste intermedie hanno durata nulla. Il treno con motori da 700 kW, essendo più potente, per percorrere lo stesso percorso in un tempo inferiore assorbe più energia. Per il treno Intercity si nota, con l'unica eccezione della tratta Milano-Roma, un'energia spesa inferiore; occorre però considerare che il motore di maggiore potenza, unito alla tecnologia di variazione dell'assetto cassa, permette l'incremento sensibile della velocità commerciale. Confrontando le simulazioni relative ad una determinata linea e

ad un certo treno si può notare come al caso di fermate intermedie corrispondano sempre percentuali di utilizzazione del motore inferiori rispetto alla situazione di percorrenza senza soste. Contemporaneamente si è verificato un maggiore utilizzo del motore nel campo relativo alle fasce più alte, dove cioè le coppie generate sono maggiori. La spiegazione di questo fenomeno va ricercata nella presenza delle soste che, se da un lato impegna maggiormente il motore per lo sforzo durante la frenatura e nel successivo avviamento del veicolo, dall'altro fanno sì che il motore, in trazione, venga utilizzato meno sulla base dello spazio percorso. Particolarmente significativo risulta anche il

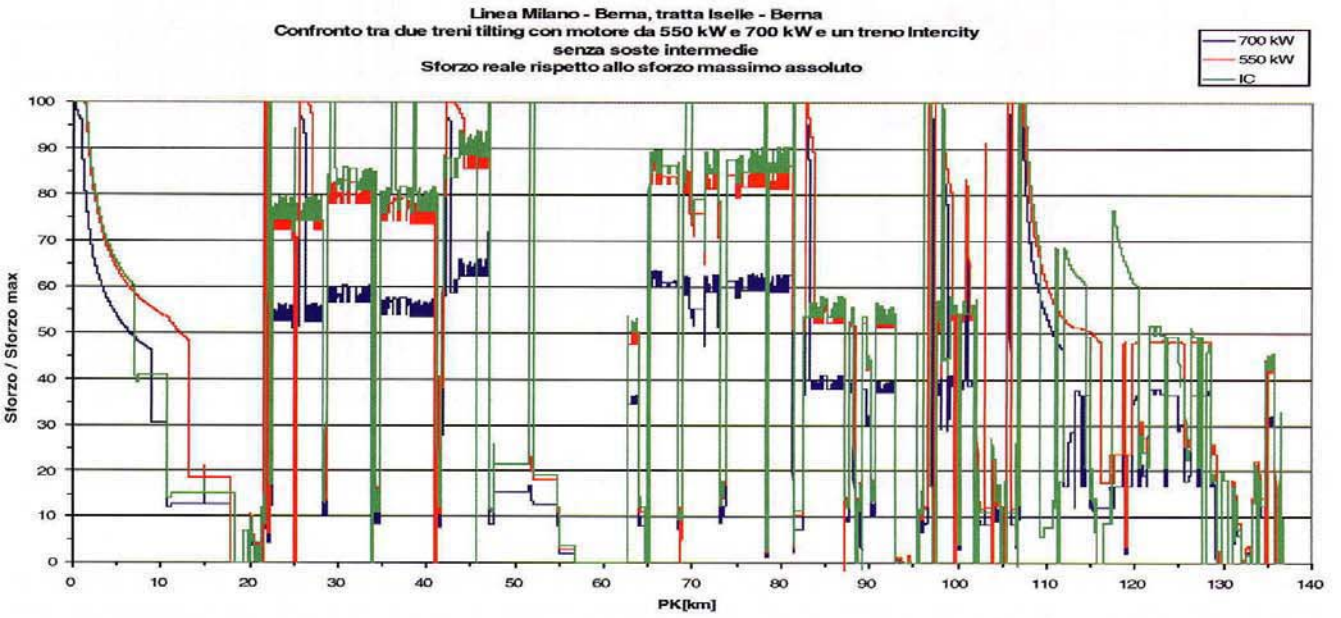

Fig. 3 - Linea Iselle – Berna: sforzo rispetto allo sforzo massimo in funzione della progressiva chilometrica per diverse tipologie di treno.

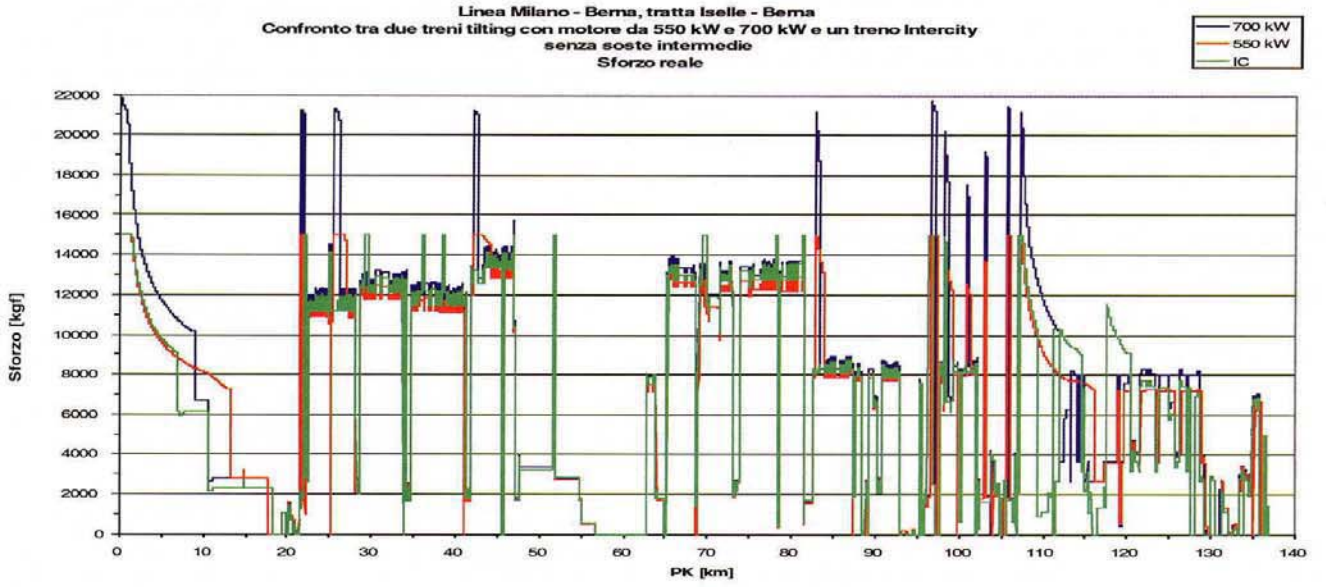

Fig. 4 - Linea Iselle – Berna: sforzo reale in funzione della progressiva chilometrica per diverse tipologie di treno.

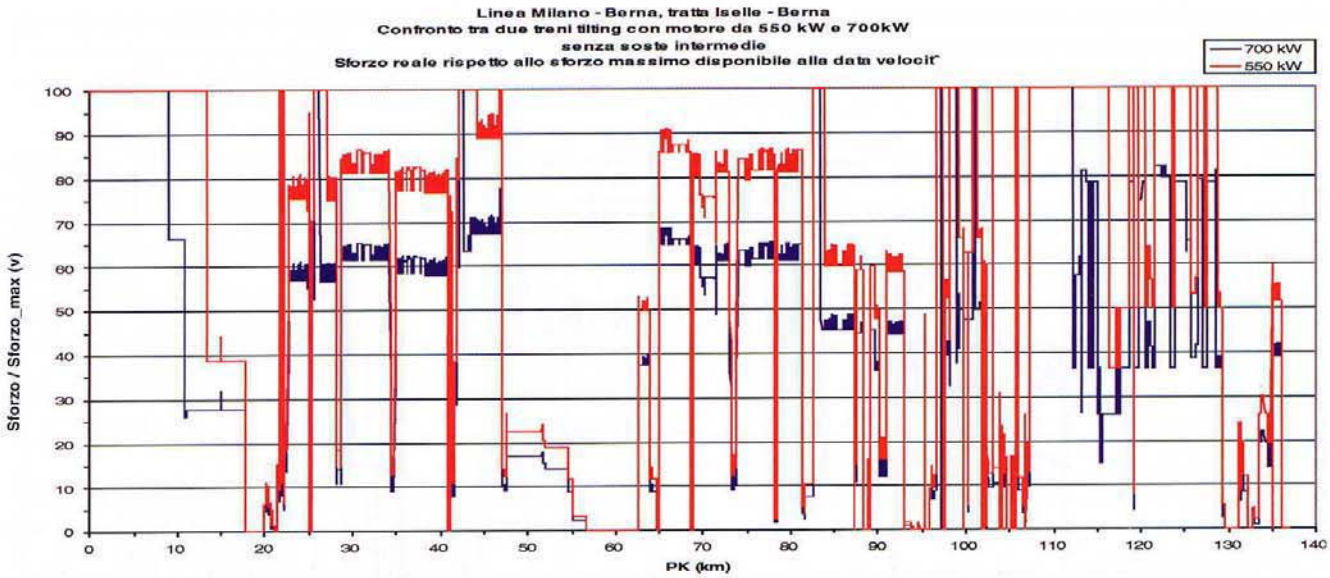

Fig. 5 - Linea Iselle – Berna: sforzo reale rispetto allo sforzo massimo possibile alla data velocità in funzione della progressiva chilometrica per diverse tipologie di motore.

confronto tra i tre diversi treni impegnati sullo stesso servizio. Si può notare come la velocità commerciale tra i due treni ad assetto variabile ed il treno Intercity sia sensibilmente diversa (15-20%, secondo le tratte), con differenze più marcate quando si affrontano tratte particolarmente tortuose. E' evidente, inoltre, come non ci siano variazioni significative nel tempo di percorrenza della tratta tra i due treni ad assetto variabile seppure l'ultima versione disponga di una potenza superiore del 27% circa rispetto al Pendolino tradizionale. Se, infatti, si considera la tratta Iselle-Berna con la presenza di tre soste intermedie - sempre di durata nulla - si può notare come il guadagno, in termini di riduzione di tempo di viaggio, sia pari a 0.0331 ore (corrispondenti a 2' circa) su un totale di 1h15' (-2.7%). Il motore più potente riuscirà quindi a garantire accelerazioni e decelerazioni più alte ma non porterà grandi vantaggi in termini di velocità commerciale del servizio. L'adozione di un motore più potente ha però il vantaggio di presentare un migliore sfruttamento dello stesso. Le percentuali di utilizzazione divise per classi di coppia dimostrano come il nuovo motore venga utilizzato maggiormente nelle fasce medie e basse di coppia mentre il motore da 550 kW presenta percentuali maggiori di utilizzo delle classi relative ai valori più alti di coppia; per dimostrarlo, è utile confrontare i diagrammi sforzo/sforzo massimo assoluto (fig. 3), sforzo (fig. 4) e sforzo/sforzo massimo disponibile alla data velocità (fig. 5) in funzione della progressiva chilometrica.

Se si osservano i primi venti chilometri dei grafici - riportati nelle tre figure - si può notare come il motore da 550 kW operi al 100% dello sforzo disponibile per un intervallo di tempo maggiore rispetto al motore da 700 kW poiché il secondo, disponendo di una maggiore potenza, permette al convoglio di raggiungere prima la velocità limite e la fase di regime durante la quale deve essere erogato uno sforzo di trazione pari alle sole resistenze all'avanzamento.

2. Il comfort

Il comfort sulle linee considerate è stato determinato, sulla base dell'analisi dei documenti [4], [6], [7], [8] e [9], per mezzo degli indici di comfort nel transitorio di ingresso in curva (P_{CT}) e di cinetosi (MSDV). Le simulazioni sono state effettuate considerando o meno la cedevolezza delle sospensioni (con coefficienti di *souplesse*[2] rispettivamente di 0.15 e 0) e, per i treni ad assetto variabile, con percentuale di compensazione dell'a_{nc} pari ad 80% e massimo angolo di inclinazione della cassa pari a 8°.

[2] Il termine «souplesse» significa flessibilità. Il coefficiente di flessibilità o di *souplesse* "s" della sospensione di un veicolo è definito nella fiche UIC 505-1 (§ 3.6 o § 4.6 nell'ottava edizione, 1997) come rapporto tra η, inclinazione dell'asse della cassa rispetto alla normale al piano del ferro, e δ, inclinazione del piano del ferro rispetto ad un piano orizzontale; il valore di s è limitato ad un valore massimo di 0.4 nella medesima *fiche* 515-1. Altra definizione di *souplesse*, ragionando in termini di accelerazioni trasversali, si trova nel rapporto ORE/ERRI - B 176 RP1, Volume 1: $s_r = b_r / b_g - 1$, essendo s_r il coefficiente di *souplesse*, b_r l'accelerazione trasversale sentita dal passeggero (nella cassa) e b_g l'accelerazione trasversale sul piano del ferro. In base a tale ultima definizione, il coefficiente di *souplesse* rappresenta l'incremento percentuale di accelerazione laterale sul pavimento della cassa rispetto a quella sulla sala montata dovuta essenzialmente alla cedevolezza delle sospensioni secondarie.

2.1. Calcolo dell'indice P_{CT} (ENV 12299:1999)

Una prima valutazione del comfort è stata effettuata per mezzo dell'indice P_{CT}; esso fornisce una misura del comfort per ogni singola curva ed è applicabile sia ai treni convenzionali sia a quelli ad assetto variabile, per qualsiasi velocità e per valori diversi di accelerazione non compensata. La norma tecnica ENV12299 [4] ne consiglia l'utilizzo nel caso in cui si vogliano modificare alcuni parametri di marcia: l'indice P_{CT} quantifica, attraverso le misurazioni, il comfort riferito all'evento singolo senza una valutazione degli effetti cumulativi.

L'indice P_{CT} esprime la percentuale di passeggeri insoddisfatti ed è formulato con la relazione

$$P_{CT} = (A \cdot \ddot{y} + B \cdot \dddot{y} - C) + D \cdot \dot{\vartheta}^{E}$$

essendo $\partial^2 y/\partial t^2$ il massimo valore di accelerazione laterale, espressa in percentuale della accelerazione di gravità; $\partial^3 y/\partial t^3$ il massimo valore del jerk, espresso in percentuale della accelerazione di gravità al secondo; $\partial q/\partial t$ la velocità angolare di rollio espressa in gradi/secondo; le costanti A, B, C, D, E valori che dipendono dalla posizione del passeggero (seduto o in piedi) all'interno della vettura, secondo quanto riportato in tabella 4. Il termine in parentesi tonda viene considerato solo se positivo.

I risultati esposti in figura 6 evidenziano che il P_{CT}, calcolato per passeggeri seduti, è migliore per il treno a rango P rispetto al treno tradizionale a rango C.

Questo andamento può essere spiegato in base alla struttura della formula mediante la quale si calcola il P_{CT} ed alle considerazioni che seguono.

A. Accelerazione laterale residua in cassa: l'effetto dell'assetto variabile è quello di diminuirne l'entità rispetto al treno tradizionale;

B. Jerk laterale in cassa: diminuendo l'accelerazione laterale di cui sopra anch'esso assume un valore inferiore per il treno a rango P rispetto a quello a rango C;

C. Velocità angolare di rollio della cassa: nel caso del treno a rango P, per effetto della tecnologia di rotazione cassa, il valore di tale parametro è molto superiore rispetto all'analogo termine per il treno a rango C. Va però osservato che la velocità angolare di rollio, nella formula del calcolo del P_{CT}, ha un peso inferiore a quello dei due termini precedenti.

In generale il termine tra parentesi nella formula del P_{CT} è minore per i treni ad assetto variabile rispetto ai treni tradizionali: nel primo caso i termini relativi ad accelerazione laterale e jerk laterale non sono nulli, piuttosto può (non è

TABELLA 4

VALORI DELLE COSTANTI CARATTERISTICHE PER L'INDICE P_{CT} (fonte: [4]).

	A	B	C	D	E
In piedi	28.54	20.69	11.1	0.185	2.283
Seduti	8.97	9.68	5.9	0.12	1.626

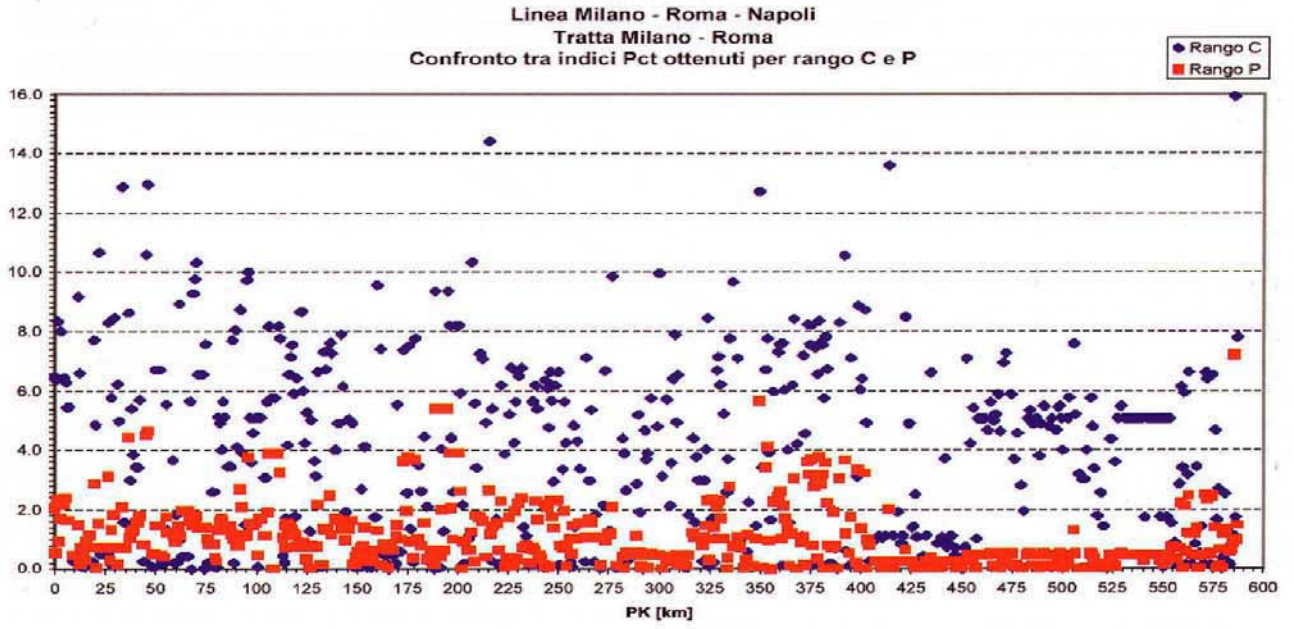

Fig. 6 - Tratta Milano – Roma: confronto tra indici P_{CT} per Rango P (a_{nc}=1.8 m/s²) e C (a_{nc}=1.0 m/s²) calcolati per velocità limite.

detto che lo sia sempre) diventare nullo il termine tra parentesi.

2.2. Calcolo dell'indice di cinetosi

Con il termine "cinetosi" s'intende l'insieme dei disturbi che alcuni individui avvertono in seguito a spostamenti passivi del corpo, sia ritmici che irregolari ([5] e [12]); l'eccitamento che provoca i disturbi può essere anche solamente visivo, ma di esso non viene tenuto conto nella trattazione che segue.

Il calcolo dell'indice di cinetosi può essere effettuato utilizzando il disturbo più penalizzante il comfort. Nel caso di un treno viene considerata come grandezza qualificante, almeno in un primo esame del fenomeno, l'accelerazione laterale residua in cassa, applicando a tale grandezza il ragionamento seguito nel documento ISO 2631 [9]. Si considera l'accelerazione laterale residua in cassa perché è la grandezza che viene ridotta applicando la tecnologia di variazione dell'assetto, permettendo così d'incrementare la velocità. L'influenza del conseguente moto di rollio della cassa verrà esposta nel seguito. Il calcolo del *"Motion Sickness Dose Value"* viene quindi effettuato applicando il metodo del *"worst component"* (*méthode du plus grand dérangement)*, secondo la relazione

$$MSDV = \left\{ \int_0^T [a_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}$$

dove T rappresenta il tempo di esposizione dei soggetti alle accelerazioni laterali non compensate ed a_w le accelerazioni stesse (fig. 7).

In termini discreti la relazione precedente può essere riscritta senza perdere di significatività come

$$MSDV = \left[\frac{T}{N} \cdot \sum a_{nc,i}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = T^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{\sum a_{nc,i}^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}}$$

essendo T il tempo totale in secondi di esposizione alle accelerazioni laterali non compensate $a_{nc,i}$ (T= somma del tempo nel raccordo di ingresso e in piena curva per ogni i-esima curva) e N il numero totale di curve.

La valutazione della cinetosi mediante gli indici *MSDV, MDRA* o una combinazione degli stessi (queste due ultime metodologie sono introdotte nelle pagine che seguono) viene eseguita considerando quanto è a conoscenza allo stato dell'arte solo dal punto di vista di un approccio al problema di tipo "soggettivo". S'intende, con tale termine, che il fenomeno cinetosi lungo una linea ferroviaria viene rappresentato unicamente mediante lo studio empirico del problema, basato sulle sole grandezze cinematiche, senza invece identificare un modello analitico che traduca l'effetto sul benessere del passeggero di più grandezze qualificanti il fenomeno, in maniera standardizzata rispetto alla sensibilità del singolo soggetto. Questo secondo tipo di approccio può essere identificato come di tipo "oggettivo" o "teorico".

L'indice *MSDV* nella formula semplificata presenta il limite di considerare la sola accelerazione laterale residua in cassa. Gli studi [6] del VTI (*Swedish National Road and Transport Research Institute*) propongono, per la valuta-

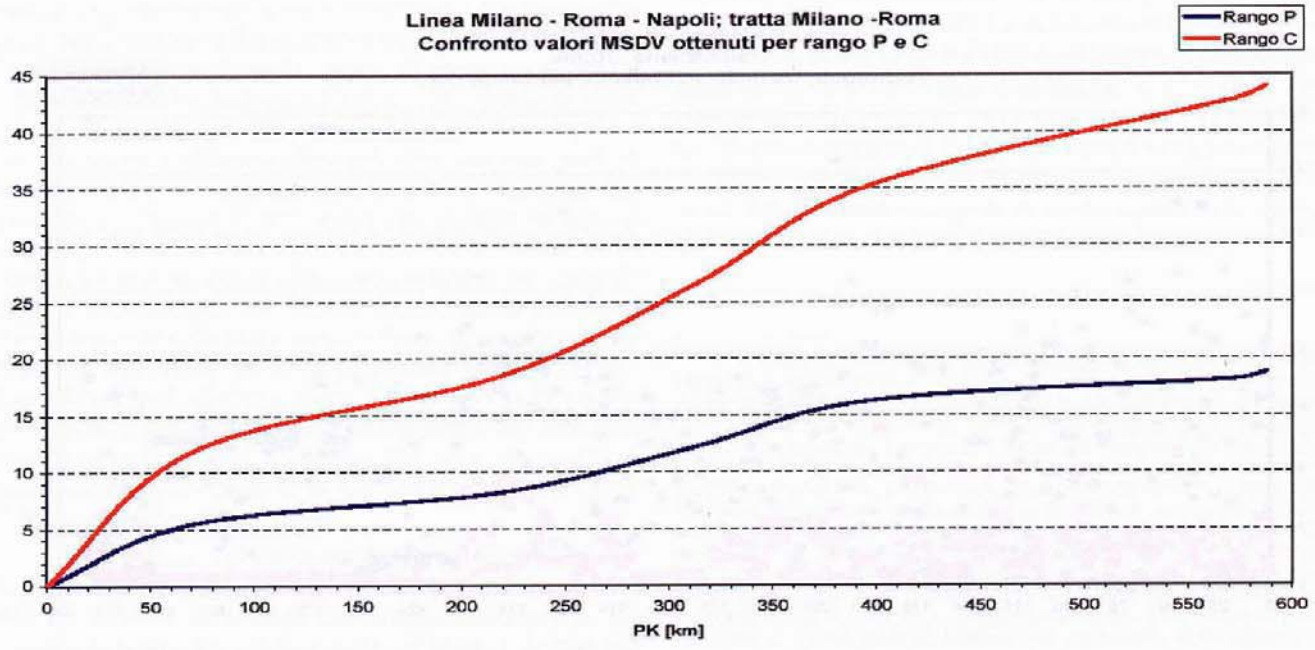

Fig. 7 - Tratta Milano – Roma: calcolo dell'indice *MSDV* per rango P e C.

zione della cinetosi, l'indice *Motion Dose Roll Acceleration* (*MDRA*)

$$MDRA = \left\{ \int_0^T [a_r(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}$$

essendo a_r l'accelerazione angolare dovuta a rollio.

Così come per l'indice MSDV, l'indice MDRA è stato utilizzato in termini discreti

$$MDRA = \left[\frac{T}{N} \cdot \sum a_{r,i}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = T^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{\sum a_{r,i}^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Considerando la sola accelerazione angolare dovuta a rollio ($a_{r,i}$), l'indice *MDRA* si presenta in contrasto con l'indice *MSDV* per quanto riguarda i risultati ottenuti (figura 8).

sata, parallela al piano del pavimento, percepita dal passeggero.

2.3. Ottimizzazione della percentuale di compensazione

Gli indici di comfort sono stati utilizzati per ottimizzare la percentuale di compensazione al fine di massimizzare il comfort percepito a bordo. I risultati presentati sono relativi a simulazioni eseguite con valore di compensazione pari all'80% e considerano un modello di treno in cui si possa inserire un valore di *souplesse*. Per determinare la percentuale ideale di compensazione sono stati eseguiti ulteriori calcoli con compensazioni rispettivamente pari a 50%, 60% e 100% considerando il solo contributo del sistema ad assetto variabile: il treno

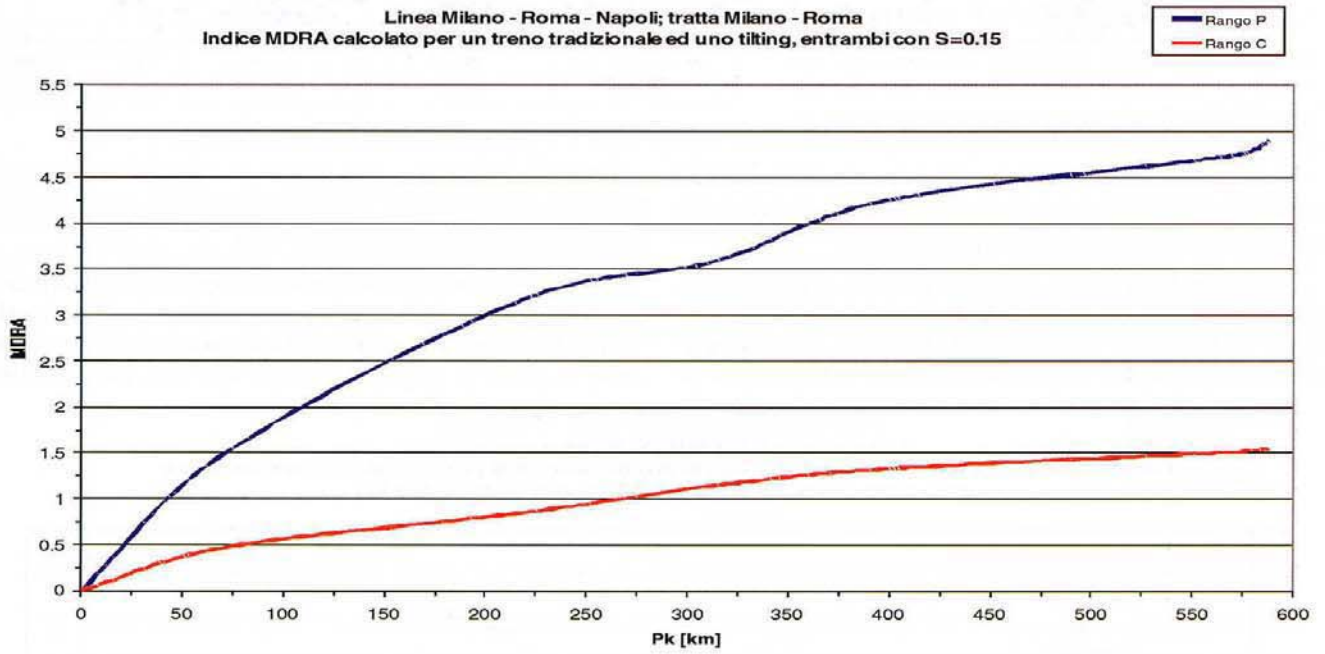

Fig. 8 - Tratta Milano – Roma: calcolo del *MDRA* per rango P e C.

Nei treni tradizionali (identificati nel diagramma da 'Rango C') il movimento di rollio della cassa è dato dalla combinazione del moto di percorrenza del raccordo che conduce alla piena curva soprelevata (o durante il transitorio di uscita) e dell'effetto della *souplesse*. Nei treni dotati della tecnologia di variazione dell'assetto della cassa, identificati nel diagramma da 'Rango P', viene ad aggiungersi il moto di rotazione imposto mediante il dispositivo, realizzato ad esempio con cinematismo a pendini ed attuatori idraulici. È però significativo ricordare che, nei treni ad assetto variabile, il moto di rollio della cassa è applicato proprio allo scopo di ridurre l'entità dell'accelerazione laterale non compen-

viaggia sulla stessa linea, con uguale profilo di velocità, assumendo zero la *souplesse*. Le differenze ottenute sono dovute solamente alla percentuale di compensazione scelta. Per tutte le simulazioni condotte ai valori percentuali su indicati è stata mantenuta la limitazione di 8° per l'angolo di rotazione della cassa. Elaborando i risultati delle simulazioni a differente percentuale di compensazione è stato inoltre riportato il risultato che si otterrebbe se venisse adottato un sistema di variazione dell'assetto cassa di tipo anticipativo, in grado di permettere la scelta della percentuale di compensazione ottimale curva per curva: questo implica la necessità di disporre - con adeguata accuratezza, integrità e continuità

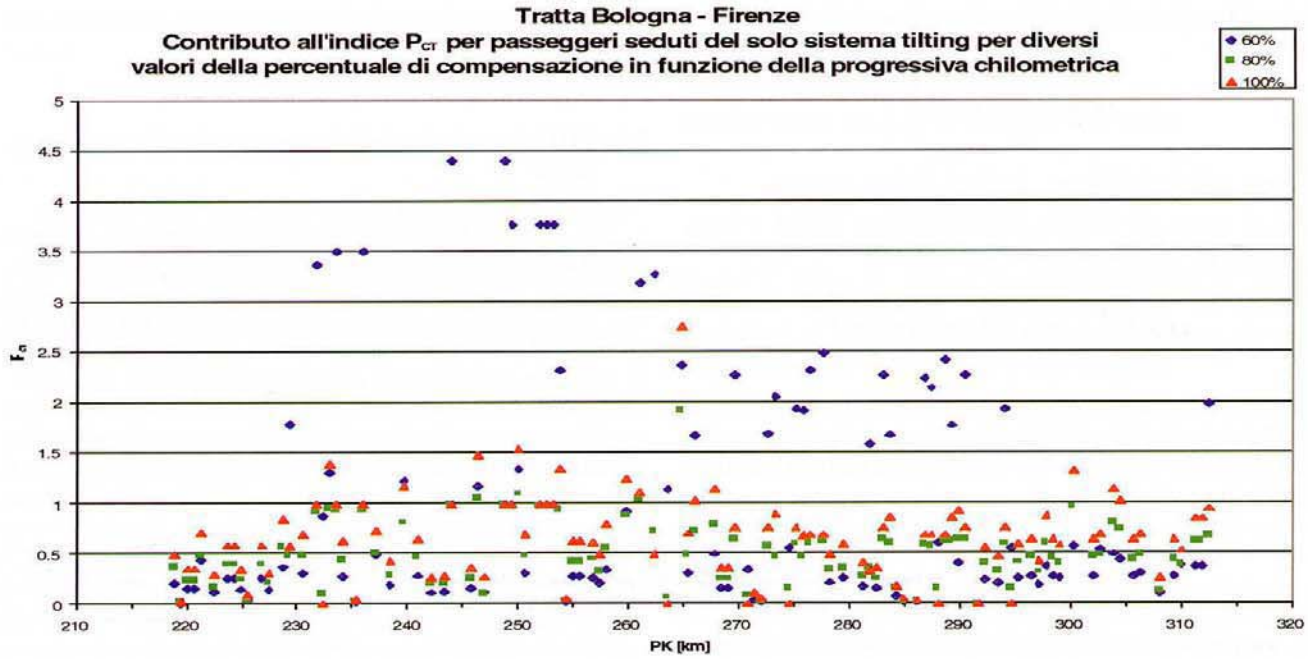

Fig. 9 - Tratta Bologna – Firenze: calcolo del P_{CT} per rango P e diverse percentuali di compensazione.

– della localizzazione del materiale rotabile ed associarne la posizione ad una cartografia digitale.

Osservando i risultati di figura 9 si nota come non esista in generale una percentuale di compensazione ottimale per tutte le curve del tracciato: l'indice P_{CT} potrà essere ottimizzato soltanto attraverso l'adozione di un sistema di pendolamento in grado di impostare curva per curva il valore ottimale di percentuale per essa.

La scelta di una percentuale di compensazione diversa per ogni singola curva può però avere effetti sul comfort relativo alla cinetosi. Dal grafico di figura 10 si osserva come la curva di cinetosi con una percentuale

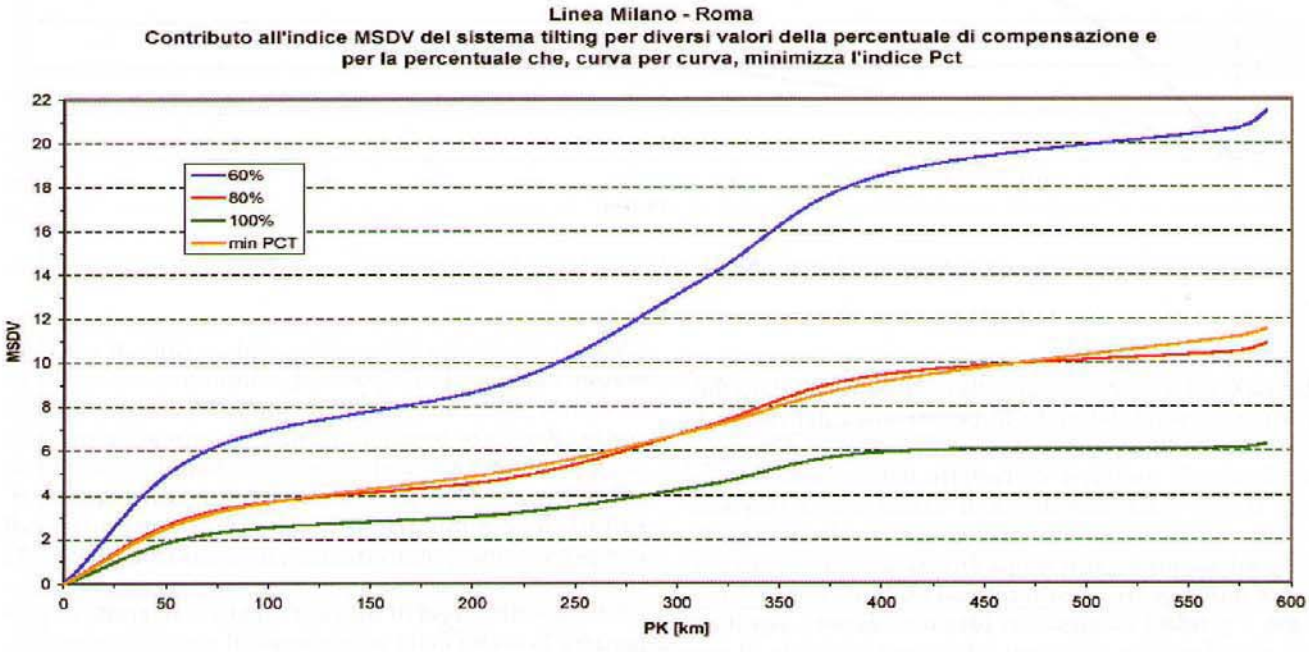

Fig. 10 - Tratta Milano – Roma: calcolo del *MSDV* per diverse percentuali di compensazione e per un sistema in grado di impostare il valore ottimale.

costante pari all'80% si avvicini con buona approssimazione a quella che identifica i valori minimi del P_{CT} su ogni singola curva.

2.4. Cinetosi: valutazione mediante combinazione lineare di *MSDV* e *MDRA*

Un indice che riesca a considerare sia l'effetto dell'accelerazione laterale residua in cassa sia l'accelerazione angolare dovuta al rollio fornirebbe un risultato più preciso riguardo all'interpretazione del fenomeno. Un modello semplice che contenga entrambi i contributi può essere ricavato dal grafico di figura 11, sulla base dei dati ricavati [11] da prove di laboratorio di SNCF e l'*Institute of Sound and Vibration Research* di Southampton (indice *Mean Accumulated Illness Rating*) e dei risultati ottenuti calcolando *MSDV* e *MDRA* sulla Milano - Roma (tabella 5) per treni di *souplesse* nulla. Si è supposto che il termine maggiorativo del contributo di rollio si mantenga costante in tutto l'intervallo di percentuale di compensazione considerato. Si ottiene una relazione del tipo MSDV+xMDRA, dove x rappresenta il coefficiente moltiplicativo dovuto a rollio. Dall'analisi degli studi [12] è stato calcolato un valore per il coefficiente x pari a 11.72.

TABELLA 5

TABELLA DI CONFRONTO: VALORI RELATIVI ALLA LINEA MILANO - ROMA

	Rango C	Rango P 80%	Rango P 60%
$P_{CT,\,medio}$	3.11	0.84	1.44
MSDV	43.92	18.77	28.56
MSDV+xMDRA	62.15	76.26	73.26

Dai calcoli effettuati sull'ottimizzazione della percentuale di compensazione al fine di ottimizzare il comfort risulterebbero vantaggiose le seguenti soluzioni.

1. Comfort relativo al transitorio di ingresso curva: la soluzione ideale varia curva per curva e sembrerebbe opportuno adottare un sistema di pendolamento di tipo anticipativo, che consentirebbe di affinare i risultati conseguiti con compensazione costante pari a 80%.

2. Comfort relativo alla cinetosi: un valore pari al 60% permetterebbe di contenere il manifestarsi del fenomeno, seppure con una minima riduzione rispetto alla scelta tradizionale dell'80%, senza peraltro avvicinarsi significativamente ai valori di rango C.

3. Per quanto concerne il fattore di amplificazione del moto di rollio, x, ricavato da [12] e coerente con analoghi valori riportati in letteratura, è utile ricordare che i dati attinti nel riferimento [12] sono relativi ad indagini sperimentali eseguite sottoponendo a test un numero limitato di persone, mediante una macchina di prova e non su di un veicolo reale. Il valore ricavato è perciò da intendere unicamente come qualitativo per la valutazione dell'indice combinato di cinetosi, MSDV+xMDRA, in cui si considerino sia il moto di rollio sia quello laterale.

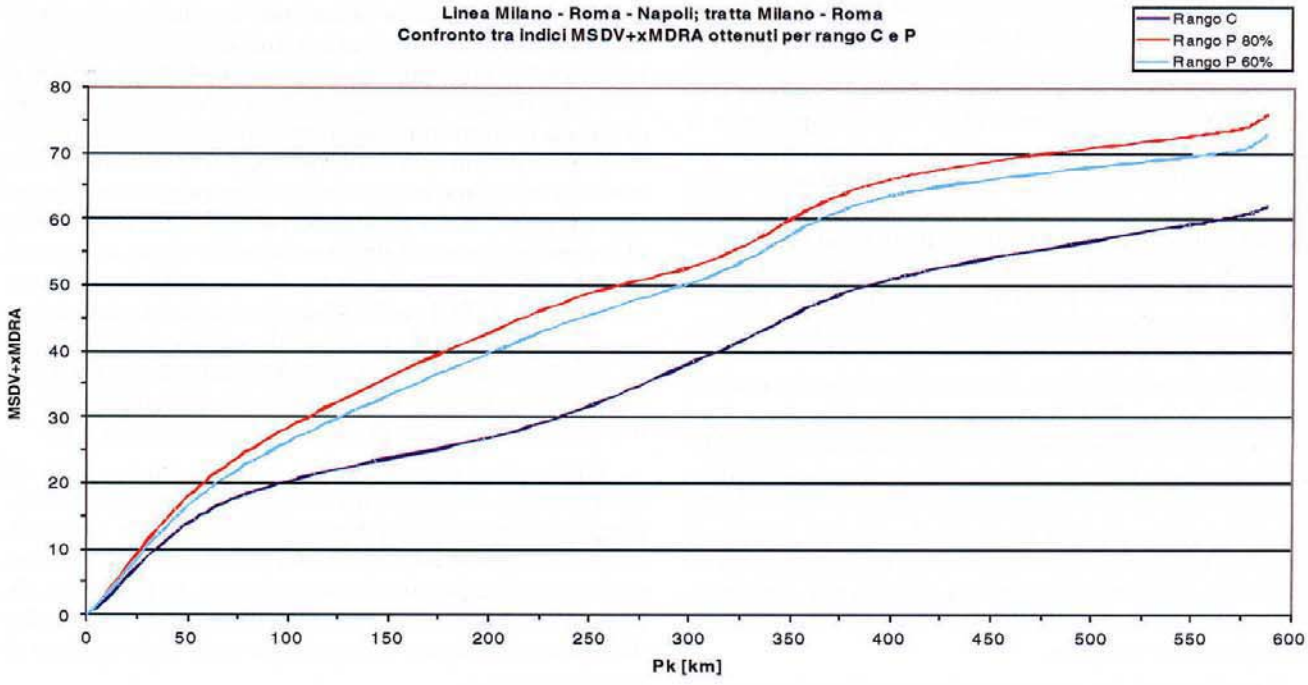

Fig. 11 - Calcolo della cinetosi secondo il modello proposto per diverse tipologie di treno.

3. Conclusioni

Il confronto delle prestazioni cinematiche ha confermato la caratteristica peculiare dei treni ad assetto variabile di adattarsi bene all'esercizio su linee tradizionali tortuose. Nel caso del Pendolino dotato di due motorizzazioni diverse, sia nominale sia con un surplus di potenza pari al 27% circa, sono stati calcolati in ambo i casi incrementi significativi della velocità commerciale con corrispondenti diminuzioni dei tempi di percorrenza. Le simulazioni effettuate hanno invece dimostrato che i vantaggi ottenuti con l'adozione di un motore più potente non consistono né nel tempo impiegato - inferiore di poche unità percentuali secondo la linea esaminata - né nell'energia spesa per realizzare il servizio; piuttosto è stato evidenziato un migliore sfruttamento del motore che si trova ad operare in un campo di funzionamento meno vicino al limite massimo di potenza, con vantaggi sia dal punto di vista meccanico sia elettrico.

Per quanto riguarda le analisi di comfort, queste sono state effettuate per treni ad assetto variabile della sola tipologia attiva: i sistemi passivi sono caratterizzati infatti da un angolo di rotazione cassa notoriamente limitato, non significativo in questa sede. Dalle simulazioni effettuate è stato riscontrato che i treni ad assetto variabile garantiscono un migliore comfort sui transitori d'ingresso curva rispetto ai treni tradizionali: la formula con cui è espresso l'indice considera, infatti, molto più importanti gli effetti dovuti ad accelerazioni e jerk laterali in cassa rispetto alle velocità angolari. L'analisi della cinetosi è stata svolta seguendo le conoscenze allo stato dell'arte su di un approccio di tipo soggettivo, basato cioè sull'analisi dei risultati di prove sperimentali, senza la traduzione matematica del legame tra il fenomeno cinetosi e le cause che lo innescano. In mancanza di una precisa normativa di riferimento, in un primo momento è stato considerato l'indice MSDV (*Motion Sickness Dose Value*) applicando il metodo del "peggior componente". Anche in questo caso i treni ad assetto variabile si sono rivelati migliori rispetto ai treni tradizionali; è bene però rimarcare che i risultati ottenuti sono condizionati dalla scelta dell'indice di riferimento. Se, infatti, si considera non l'accelerazione laterale residua in cassa ("peggior componente" per l'indice MSDV) ma l'accelerazione angolare dovuta a rollio contenuta nell'indice MDRA (*Motion Dose Roll Acceleration*) come grandezza significativa, si ottengono risultati tra loro discordi. L'indice MSDV porterà a privilegiare i treni ad assetto variabile, che riescono a mantenere basse accelerazioni in cassa: il livello di cinetosi raggiunto sulla Milano – Roma per questa tipologia di convoglio è pari al 43% di quello relativo ai treni tradizionali. L'indice MDRA, al contrario, porterà ad optare per i treni tradizionali, caratterizzati da accelerazioni angolari di rollio più contenute: il valore di cinetosi calcolato è il 32% di quello relativo ai treni ad assetto variabile.

Il problema della mancanza di un indice che caratterizzi esattamente i disturbi da cinetosi ha caratterizzato anche l'ultima parte del lavoro, quella riguardante l'ottimizzazione della percentuale di compensazione. È stato scelto di valutare il fenomeno della cinetosi mediante una combinazione lineare degli indici MSDV e MDRA.

Per determinare la percentuale ideale di compensazione ottimale sono state eseguite simulazioni con compensazioni pari a 50%, 60% e 100%, cercando di evidenziare quanto più possibile il contributo del sistema di assetto cassa, attraverso la semplificazione del modello di studio (il treno viaggia sulla stessa linea, con uguale profilo di velocità e con identico valore di *souplesse*). I risultati ottenuti per l'indice P_{CT} hanno dimostrato che non esiste una percentuale di compensazione ideale per l'intera tratta ma che il sistema di assetto cassa dovrebbe essere ottimizzato curva per curva, ottenendo così indiscutibili vantaggi per il comfort dei passeggeri: questa possibilità, fino ad oggi tecnicamente non realizzabile, potrebbe diventare attuabile con l'introduzione di sistemi di variazione dell'assetto cassa con comando di tipo anticipativo, che utilizzino un database della linea e non (solo) un sistema di accelerometri e giroscopi per il rilevamento dell'entrata in curva, da mantenere comunque come soluzione di riserva per garantire l'affidabilità del sistema. La possibilità di adottare questo nuovo comando è stata valutata anche sotto l'aspetto della cinetosi ottenendo risultati non troppo lontani da quelli caratterizzati da una percentuale di compensazione dell'80%. Per il comfort sui transitori di ingresso, la soluzione ottimale, tra quelle in questo momento realizzabili, è stata riconosciuta in una percentuale di compensazione dell'80% (quella oggi adottata sulla maggior parte dei treni ad assetto variabile attivo), seguita dal 100% ed infine dal 60%.

Per quanto riguarda la cinetosi, la soluzione migliore allo stato dell'arte è sembrata essere pari a circa il 60%. La tendenza dovrebbe quindi essere quella di limitare in parte l'effetto dell'assetto variabile. Una volta stabilito il valore ideale è stato abbandonato il modello semplificato adottato nell'ottimizzazione, per condurre tre simulazioni confrontando l'andamento del comfort per un treno Intercity, un primo treno ad assetto variabile con percentuale di compensazione dell'80% e un secondo treno, sempre ad assetto variabile, con il 60% (tutti con coefficiente di *souplesse* pari a 0.15). I risultati hanno dimostrato che un treno ad assetto variabile tradizionale sarebbe caratterizzato da un indice di cinetosi 1.23 volte quello di un Intercity, mentre l'adozione di una percentuale di compensazione minore permetterebbe di abbassare il rapporto a 1.18.

Il fatto che i due aspetti affrontati portino a scelte diverse, che possono apparire addirittura in contraddizione, costituisce un problema di non facile soluzione, perché limitare la cinetosi adottando una percentuale di compensazione minore provoca inevitabilmente, se non viene abbassata la velocità di percorrenza della linea, una perdita di comfort istantaneo nella maggior parte dei transitori di ingresso curva.

Va ricordato che il fattore di amplificazione (x) appli-

cato al contributo determinante del moto di rollio (MDRA), è ottenuto da indagini sperimentali compiute in laboratorio e non su veicoli reali, e dovrà essere quindi soggetto ad ulteriori validazioni.

Uno sviluppo del presente studio potrebbe essere volto ad ottenere il profilo della percentuale di compensazione ottimale, variabile cioè lungo la tratta percorsa, in modo che applicando un controllo anticipativo sia possibile realizzare il miglior compromesso per raggiungere il miglior livello di comfort valutato sia come PCT sia dal punto di vista della cinetosi. Ulteriore approfondimento dello studio può essere dato dall'analisi degli indici di cinetosi ottenuti procedendo secondo un approccio di tipo oggettivo ([2], [3]), cioè secondo una riproduzione del fenomeno definita da un legame matematico tra le grandezze che si ritiene siano qualificanti nel determinare l'insorgenza del malessere e la cinetosi stessa. Nell'ambito dell'attività di ricerca nel campo del comfort ferroviario, sostenuta dall'Unione Europea, sono previste due campagne di prove in linea relativamente allo studio del fenomeno cinetosi: la prima, in ordine temporale, nella Regione Scandinava e la seconda in Sud Europa. I dati rilevati durante quest'ultima serie di prove, costituiti dai questionari compilati dai passeggeri e dai segnali di spostamento, velocità e accelerazione delle grandezze qualificanti il fenomeno, verranno elaborati in modo da valutare l'indice di cinetosi oltre che con il tradizionale metodo 'soggettivo' anche con il suindicato approccio 'oggettivo'. Per tale metodologia è stato previsto l'utilizzo di un accelerometro in direzione laterale ed uno in quella verticale in corrispondenza del poggiatesta di due passeggeri, seduto ciascuno in corrispondenza al sedile più vicino all'estremità del convoglio. Infatti, da quanto esposto in [2] e [3], studi elaborati e prodotti dall'Università di Perugia, si considera che l'elemento qualificante l'insorgenza della cinetosi sia determinato dal conflitto tra l'orientamento atteso dal passeggero e da quanto percepito dallo stesso. Tale conflitto verrebbe esplicitato considerando anche le accelerazioni verticali e laterali cui viene sottoposta la testa del passeggero durante la percorrenza in treno.

BIBLIOGRAFIA

[1] M. Balli, P. Cossu (2002), *Valutazione del comfort in curva sui treni ad assetto variabile*, XXXI Convegno nazionale AIAS, 18-21 settembre 2002, Parma (I).

[2] C. Braccesi, F. Cianetti (2001), *Implementazione di un modello di valutazione della cinetosi in treni ad assetto variabile*, XXX Convegno nazionale AIAS, 12-15 settembre 2001, Alghero (I).

[3] C. Braccesi, M. Cavalletti, F. Cianetti (2001), *Implementazione di una procedura automatica per la valutazione del comfort in veicoli ferroviari*, XXX Convegno nazionale AIAS, 12-15 settembre 2001, Alghero (I).

[4] CEN ENV (1999), Railway applications – Ride comfort for passengers – Measurement and evaluation ENV 12299:1999.

[5] C. Darlot, S. Eskiizmirliler (1999), *Simulation de la physiologie des cinetoses et pendulation active*, Studio finanziato da Telecom Paris, CNRS URA 820, Rapport final, Décembre 1999.

[6] J. Förstberg (2001), *Regression models for provoking motion sickness in tilting train*, WCRR 2001 - World Congress on Railway Research, Atti del congresso, Köln (D).

[7] J. Förstberg, B. Kufver (2003), *Analysis of comfort in tilting trains – Simplified methods*, Draft version for FACT 8/5/2003.

[8] J. Förstberg, B. Kufver (2001), *Research on the specific aspects of tilting*, WCRR 2001 - World Congress on Railway Research, Atti del congresso, Köln (D).

[9] International Standard Organisation (1997), *ISO 2631 Standard: "Mechanical vibration: evaluation of human exposure to whole body vibrations"*.

[10] A. Montepara, F. Giuliani (2002), *Problematiche geometriche della poligonale d'asse delle linee A.V.*, Ingegneria Ferroviaria, Marzo 2002.

[11] D. Purves, G. Augustine, D. Fitzpatrick, L. Katz, A. LaMantia, J. McNamara (2000), *"Neuroscienze"*, Zanichelli.

[12] F. Quetin, P. Clement, M. Griffin, B. Lobb (2001), *Studies about motion sickness, Effect of combined lateral and roll oscillations*, WCRR 2001 - World Congress on Railway Research, Atti del congresso (Id. number 169), Köln (D).

[13] H. Suzuki, H. Shiroto, A. Tanaka, K. Tezuka, S. Nakagawa (1998), *Effects of vibrational factors on the riding comfort of tilting train passing curve transitions*, WCRR 1999 - World Congress on Railway Research, October 19-23, 1999, Tokyo (J).

(Sommari a tergo)

Sommaire

TRAINS À CONFIGURATION DE POSITION VARIABLE ET TRAINS TRADITIONNELLES: PERFORMANCES CINÉMATIQUES ET ANALYSES CONFORT POUR L'OPTIMISATION DE LA COMPENSATION

L'article se réfère aux trains à configuration de position variable et traditionnelles pour lesquels on met à rapport les performances cinématiques et le confort aperçu à bord. Les trains à configuration de position variable permettent une vitesse majeure dans les virages par rapport aux trains traditionnels, mais par cor les mouvements de rôlage plus accentués peuvent influer négativement sur le confort aperçu par les passagers. Dans l'article le confort est affronté au moins par rapport à deux sujets: la cinétique (indexes MSDV et MDRA) et le niveau de confort aperçu par les passagers dans les phases de marche relative à l'entrée dans les virages (index P_{ct}). Le but finale de l'article est l'analyse de l'optimisation du pourcentage la compensation, au fin de réaliser un train à configuration de position variable rapide et confortable, jusqu' envisager un système de variation de position de la caisse de type anticipatif.

Summary

TRADITIONAL AND TILTING TRAINS: KINEMATICS FEATURES AND ANALYSIS OF THE COMFORT FOR THE OPTIMISATION OF THE TILT COMPENSATION

The paper is concerned with tilting and traditional trains, for both of which kinematics features and comfort, perceived on board, are compared. The tilting trains allow higher speed on curves when compared with the traditional rolling stock, still the higher rolling movement could – sometimes – influence the comfort felt by passenger due to increased car body roll movements. In this paper, the comfort is taken into account in relation with two aspects: the motion sickness (MSDV and MDRA indexes) and the discomfort of passengers during the running on transition curves (P_{ct} index). Final purpose of the paper is the analysis of the optimisation of the tilt compensation, aimed at realising a tilting train at the same time fast and comfortable, reaching the hypothesis of anticipative tilting systems.

Zusammenfassung

NEIGEZÜGE UND TRADITIONELLES MATERIAL: KINEMATIK UND KOMFORTANALYSE ZUR OPTIMIERUNG DER KOMPENSATION

Der Artikel befasst sich mit Zügen in Neigetechnik und traditionellen Zügen hinsichtlich der kinematischen Eigenschaften und dem Fahrkomfort an Bord. Neigezüge gestatten höhere Geschwindigkeiten im Bogen als traditionelle Züge, dennoch können die stärkeren Schlingerbewegungen zuweilen den von den Fahrgästen wahrgenommenen Komfort negativ beeinflussen. Der Fahrkomfort wird hier unter zwei Aspekten betrachtet: Kinetose (MSDV - und MDRA - Zahl) und das Unbehagen, welches die Fahrgäste beim Durchfahren der Übergangsbögen empfinden (P_{ct}-Wert). Zweck des Beitrags ist letztendlich die Analyse zur Optimierung des Prozentsatzes an Kompensation, der für einen schnellen und gleichzeitig komfortablen Neigezug erforderlich ist, wobei auch ein System zur Steuerung der Wagenkastenneigung durch Antizipierung denkbar ist.