Tecnologia

L'alta velocitat, un nou mode de transport

Condicionments de qualitat derivats de les noves prestacions ferroviàries

Andrés López Pita

CATEDRÀTIC DE FERROCARRILS
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Aquest article es basa en un treball que, dins l'àmbit de les "Noves Tecnologies en el Transport Ferroviari" va presentar l'autor en el IV CURSO GENERAL DE TRANSPORTES TERRESTRES que, organitzat per la FUNDACIÓN DE LOS FERROCARRILES ESPAÑOLES, ha tingut lloc a Madrid entre el 5 de març i el 27 de juny d'enguany.
Les qüestions referides al transport de llarga distància, i que van ser, en concret, l'objecte de la seva intervenció, s'aborden també en aquest article que, sota el títol que l'encapçala, s'orienten envers l'anàlisi de les exigències que, en matèria de qualitat, introdueix aqueixa nova prestació ferroviària que és l'alta velocitat, tant en l'àmbit del transport de viatgers com de mercaderies.

L'alta velocitat és alguna cosa més que no pas la circulació a velocitats més grans; és, sens dubte, un sistema complex en què hi ha una estreta interrelació entre cadascun dels subsistemes que el formen. Podríem dir, sense exagerar gens, que és un nou mode de fer transport, que té una relació força limitada respecte d'aquell mitjà que fa més de 150 anys que començà a funcionar. Solament s'assemblen en el paral·lelisme que podrà establir-se, temps a venir entre la revolució que va representar l'un i l'altre ferrocarril en el món del transport en èpoques diferents.

Desenvolupar una temàtica tan àmplia com aquesta obliga a fer un esforç important de síntesi que espero que no es contradigui amb la comprensió dels diferents aspectes que exposo a continuació.

L'anàlisi dels condicionants de qualitat que exigeix aquesta nova prestació ferroviària de l'alta velocitat ha d'abastar els camps referits a:

a) Construcció d'una nova infrastructura.

b) Instal·lacions fixes (via, senyalització, comunicacions, captació de corrent).

c) Material mòbil.

d) Explotació tècnica i comercial de la línia.

El desenvolupament d'aquests camps constitueix l'objecte dels apartats següents.

1. Evolució del coneixement de la problemàtica que presenta la circulació a alta velocitat i a molt alta velocitat

Actualment s'accepta amb tota naturalitat la circulació de composicions ferroviàries a velocitats compreses, per als serveis comercials, entre 200 i 300 km/h.

Tanmateix, per a arribar a aquesta realitat el ferrocarril ha hagut de superar una sèrie d'obstacles, que no eren més que llacunes del coneixement, servint-se d'un procés investigador que, per al límit de velocitat esmentat abans, 300 km/h, ha durat més de 20 anys. En aquest procés es troben les claus que avui dia permeten circular, amb total garantia, a velocitats elevades, gairebé inimaginables fa un quant temps no gaire allunyat.

De fet fins l'any 1967, moment temporal d'entrada en servei a Europa dels primers trens comercials a 200 km/h, el binomi traçats construïts durant el segle passat/velocitat, coexistí sense que els avenços que experimentava el coneixement del material mòbil ferroviari, amb prou feines tingués limitacions a la via per a desenvolupar les prestacions que pel disseny del material era possible d'assolir.

El cas és, tanmateix, que la introducció comercial dels 200 km/h de velocitat punta fou precedida per una notable exploració de l'interval de velocitats comprès entre 200 i 250 km/h, tenint present el criteri francès que assenyala la conveniència de demostrar la factibilitat de la velocitat V+10, si desitgem de fer operativa comercialment la velocitat de V (km/h).

Des d'aquest punt de vista resulta d'interès recordar que des de la històrica data de 1955 quan s'aconseguiren els 331 km/h en experimentació, els ferrocarrils francesos havien desenvolupat més de 250 circulacions a velocitats compreses entre els 200 a 250 km/h, amb anterioritat a 1967, tal com mostra el quadre 1.

Quadre 1
Circulacions d'assaig a 200/250 km/h durant el període 1960 - 1967

Velocitat (km/h)	Nre. de circulacions
200/210	166
220/230	57
240/250	30

A partir de 1967 s'investigà, en conseqüència, la platja de velocitats que assolia i que superava els 300 km/h, amb la distribució de circulacions d'assaig indicada al quadre 2.

Quadre 2
Circulacions d'assaig a 250/300 km/h durant el període 1967 - 1978

Velocitat (km/h)	Nre. de circulacions	Any
200 a 280	47	1970
300 a 318	175	1972-78
300 a 306	>100	1977-78

És dir, que el projecte de la nova línia París-Lió a 260/270 km/h de velocitat màxima fou precedit per més de 300 circulacions d'assaig amb velocitats superiors als 260/270 km/h esmentats.

Aquest conjunt de circulacions experimentals, unit a nombrosos estudis teòrics, permeté d'assentar les bases de l'alta velocitat des del punt de vista de la seva factibilitat tècnica.

2. Condicionaments de qualitat en relació amb la infrastructura i superstructura de via

La relació de paràmetres més significatius que cal definir en una via de ferrocarril l'hem sintetitzada al quadre 3. La concreció d'algunes de llurs magnituds requereix l'anàlisi de les següents particularitats:

a) els fenòmens d'interacció mútua que tenen lloc entre la via i el vehicle.

b) els fenòmens aerodinàmics que comporta la circulació a alta velocitat.

Els primers s'enquadren normalment dins la disciplina coneguda com a "dinàmica ferroviària" que comprèn l'estudi dels moviments tant verticals com transversals dels vehicles.

Atès el caràcter general del Curs de Transports, em limitaré a exposar els principals resultats als quals he arribat en les investigacions realitzades sobre el tema, i la repercussió que tenen des del punt de vista de les exigències de qualitat en alguns dels paràmetres indicats al quadre 3.

2.1. Dinàmica vertical

Les sollicitacions verticals exercides pel material durant la seva circulació per la via poden avaluar-se a partir de la fórmula de Prud'homme:

$$Q_T = Q_E + \Delta Q_D$$

essent:

Q_T = esforç vertical total produït per una roda sobre el carril

EL CONCEPTE D'ALTA VELOCITAT

Resulta convenient de recordar que el naixement de l'alta velocitat comercial en el ferrocarril tingué lloc, tal com hi ha qui diu habitualment, quan s'engegà l'explotació de la nova línia entre Tokio i Osaka, el primer d'octubre de l'any 1964, perquè s'hi aconseguí, per primera vegada en serveis comercials de caràcter regular, els 210 km/h de velocitat punta.

El reconeixement d'aquesta data porta implícita la idea d'admetre que el sostre de velocitat abans indicat correspon al significat pràctic del concepte "alta velocitat".

En realitat no hi ha un acord general explícitament formulat sobre què representa el terme esmentat; aclariment que si bé en l'aspecte formal pot no tenir gaire interès, sí que és rellevant quan se n'analitzen els aspectes de fons.

En aquest àmbit, em sembla particularment útil la concreció aportada el 1981 per l'actual Secretari General de la UIC, Jean Bouley, en designar per alta velocitat "tota circulació amb una velocitat superior, i àdhuc netament superior a la velocitat màxima que, en general, és possible de practicar pels traçats clàssics, és a dir, els 200 km/h de velocitat punta".

S'assigna normalment a l'interval dels 200/300 km/h el terme "alta velocitat" i es reserva el de "molt alta velocitat" a les circulacions que sobrepassin els 300 km/h. Tots dos casos impliquen la necessitat de construir línies noves.

En l'àmbit europeu, l'era de l'alta velocitat es desenvolupà, per tant, a partir de setembre de 1981, amb l'obertura parcial de la nova línia París-Lió, en la qual s'assoliren inicialment els 260 km/h de velocitat màxima i, poc temps després, els 270 km/h, precisament per una faceta de qualitat de l'explotació.

Q_E = esforç estàtic exercit per una roda

ΔQ_D = esforç exercit per la roda

Aquest darrer terme ΔQ es quantifica per l'expressió:

$$\Delta Q = \sqrt{\sigma^2 (\Delta Q_{NS}) + \sigma^2 (\Delta Q_S)}$$

essent:

$\sigma (\Delta Q_{NS})$ = Desviació típica que és deguda a les masses no suspeses del vehicle, determinada per la relació matemàtica

$$\sigma (\Delta Q_{NS}) = K.b.V.\sqrt{m.h.}(1)$$

essent:

K = paràmetre que representa l'esmorteïment pel suport de la via.

b = paràmetre que caracteritza l'amplitud dels defectes de la via i del material.

V = velocitat de circulació del vehicle ferroviari.

m = massa no suspesa.

h = rigidesa vertical de la via.

D'altra banda $\sigma (\Delta Q_S)$ resulta possible d'ésser avaluada per la relació:

$$\sigma (\Delta Q_S) \simeq (0{,}12 \text{ a } 0{,}14)\, Q_E \quad (2)$$

Als efectes de l'objectiu d'aquesta exposició que es dedueix de l'expressió (1):

1r) *L'interès d'incrementar l'esmorteïment del suport de la via*, la qual cosa es tradueix en:

a) augmentar el gruix de les plaques d'assentament de 4,5 mm (utilitzades normalment si V<200 km/h a 9 mm (preferides si V>200 km/h).

b) augmentar el gruix de la capa de balast, per la seva capacitat esmorteïdora, de 20 a 25 cm en algunes línies existents fins als 35 cm del París-Lió.

2n) *L'interès de reduir el paràmetre b que caracteritza els defectes de la via*, la qual cosa vol dir:

a) exigir, a les línies d'alta velocitat, a més d'un límit inferior en

Quadre 3

Paràmetres més significatius que defineixen la infrastructura i la superstructura d'una via fèrria

I	**PARÀMETRES RELACIONATS AMB LA INFRASTRUCTURA**		
	Plataforma natural	Capacitat portant	
		Capes d'assentament en trinxera i terraplè	
	Plataforma artificial	Ponts	Tipologia/Tren de càrregues
			Disposicions constructives
		Túnels	Secció transversal d'aire lliure
			Tipologia de la via
G	**PARÀMETRES RELACIONATS AMB LA GEOMETRIA DE LA VIA**		
	En planta	Radi de les corbes Peralt màxim	
		Corbes de transició Entrevia	
	En alçat	Radi dels acords	
		Rampes màximes i llur longitud	
	Relacionats amb la qualitat geomètrica de la via	Anivellament longitudinal i transversal	
		Alineació i guerxesa	
		Ample de via	
		Indicador global de qualitat	
A	**PARÀMETRES RELACIONATS AMB L'ARMAMENT DE VIA**		
	Carril	Pes per metre lineal	
		Resistència	
		Defectes admissibles de fabricació	
	Subjeccions	Força de collada o subjecció	
		Freqüència pròpia de vibració	
	Travesses	Natura	
		Dimensions i pes	
		Separació	
	Balast	Característiques resistents	
		Gruix	
		Procediment de col·locació	
	Plaques d'assentament	Natura i gruix	
		Flexibilitat vertical	
	Aparells de via	Tipologia	
		Velocitat màxima per via desviada	

la magnitud dels defectes geomètrics puntuals, una major qualitat per al conjunt de seccions de via d'aproximadament 300 m de longitud.

3r) *L'interès de disminuir la rigidesa vertical (h) de la via,* la qual cosa es tradueix en les repercussions pràctiques següents:

a) com que una via amb travesses de fusta té una rigidesa aproximadament inferior en un 50% a la que té una via amb travesses de formigó se'n dedueix l'interès d'utilitzar fusta.

Tanmateix, aquest avantatge té la seva contraindicació en menor contribució a la resistència lateral de la via, la qual cosa fa preferibles les travesses de formigó.

b) desaconsella els ponts metàl·lics ja que presenten una rigidesa vertical més alta (amb independència d'unes altres causes).

c) obliga a trobar un punt òptim de la rigidesa vertical, atès que per sota d'un cert valor d'aquesta poden presentar-se determinats problemes de ressonància, els quals incrementen la resistència a avançar dels vehicles i, per tant, fan augmentar el consum energètic.

El gràfic de la fig. 1, proporciona una primera orientació sobre la solució de compromís esmentada.

Finalment, el registre de la densitat espectral de les acceleracions mesurades a les caixes de greix dels vehicles, presenta una variació del tipus indicat a la fig. 2.

Es pot observar que hi ha un interval de freqüències crítiques (f1, f2) per al qual l'acceleració vertical s'amplifica notablement. Aquest interval varia amb la velocitat; tanmateix, per a 200<V <300 km/h es poden adoptar els valors següents: 35 a 55 Hz, amb un valor mitjà de 45 Hz.

Però aquesta freqüència a 300 km/h correspon a defectes de longitud d'ona d'1,8 m. Aquests defectes, atesa la incidència negativa que tenen, han conduït a limitar l'amplitud d'aquests, d'1 mm (per a les línies normals) a 0,3 mm per a les línies d'alta velocitat.

essent:

Fig. 1

Optimació de la rigidesa vertical de la via

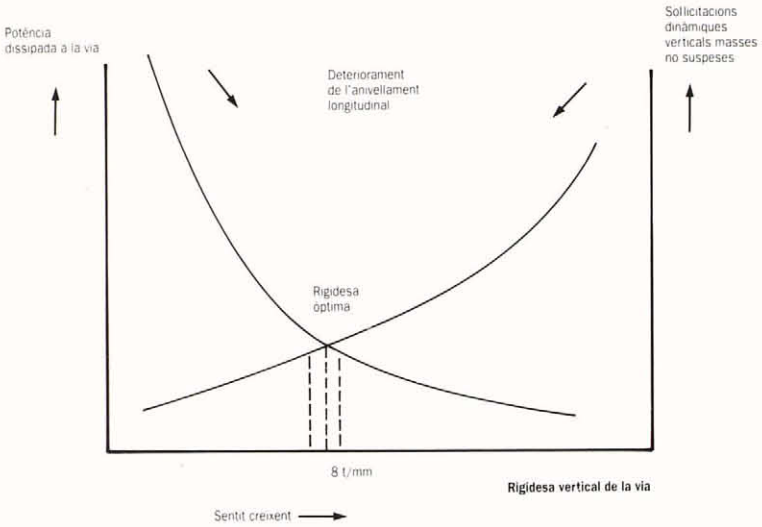
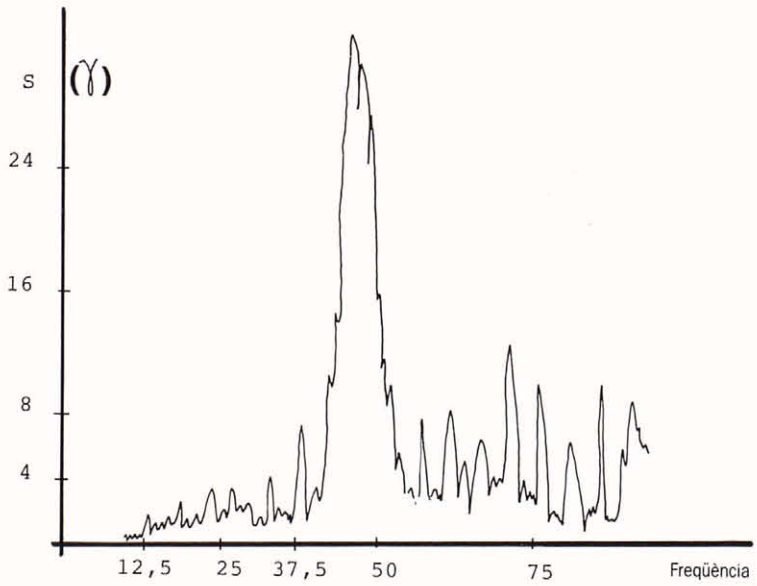


Fig. 2

Densitat espectral de les acceleracions mesurades a les caixes de greix dels vehicles d'alta velocitat



2.2. Dinàmica transversal

La circulació en corba origina sobre el viatger una acceleració transversal que afecta el confort. Aquesta acceleració (γsc) s'expressa mitjançant*:

$$\gamma sc = \frac{V^2}{R} - \frac{h}{s} g$$

* Per a més detalls vegeu la publicació "Posibilidades en la reducción de los costes de mantenimiento de la calidad geométrica de una vía mediante la introducción de nuevos criterios en su diseño".

A. López Pita, XIV Congreso Panamericano de Ferrocarriles, 1984.

V = velocitat de circulació

R = radi de la corba

h = peralt existent a la via

s = distància entre eixos de carrils

g = acceleració de la gravetat

Com que (s) i (g) són constants, i h és limitat per diverses causes a 160/180 mm es dedueix que per a una γsc ≈ 0,7 m/s (valor que pot ésser considerat vàlid a efecte de referència), el radi R de les corbes ha de superar els 3.000 m, si es desitja circular a velocitats de l'ordre de 270/300 km/h.

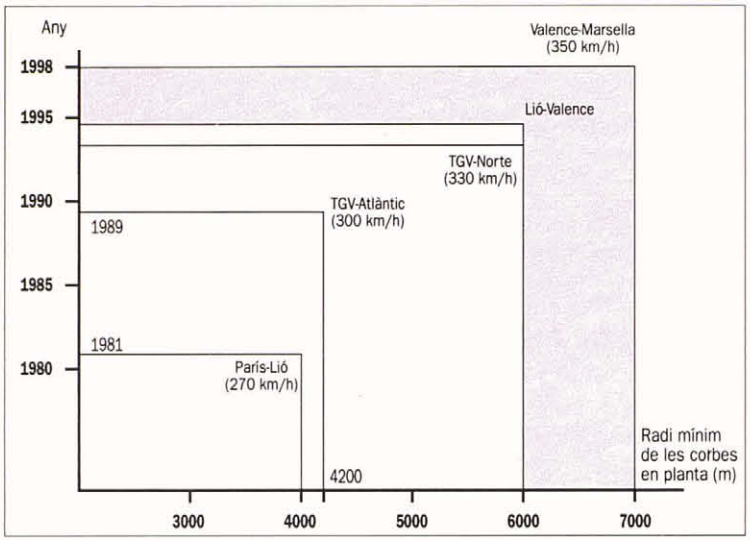
Aquesta és una diferència fonamental, la magnitud dels radis per a línies d'alta velocitat, molt superiors a aquells que és possible de trobar als traçats construïts durant el segle passat, on abunden les corbes de 600 a 1.000 m de radi.

Té interès assenyalar que els continus progressos que tenen lloc pel que fa al material ferroviari i que possibiliten nous rècords de velocitat, tot i que han estat assolits en circulacions experimentals, han modificat el criteri de disseny en planta de les noves línies d'alta velocitat, tal com mostra el gràfic de la fig. 3, on hem recollit l'evolució que ha tingut lloc durant la dècada passada.

Cal recordar, no obstant això, que ja durant el començament dels anys 70, amb motiu del projecte de les noves línies alemanyes, s'adoptà el radi mínim de 7.000 m, tot i que la seva justificació es trobava en la decisió d'acceptar que circulessin juntament amb els trens ràpids de viatgers uns altres de mercaderies, i no pas en una previsió real de la possibilitat d'assolir en el futur velocitats compreses entre 300 i 350 km/h.

Fig. 3

Evolució de les característiques geomètriques en planta de les línies d'alta velocitat



En tot cas l'adopció d'aquests radis de corba tan amplis pot pesar de manera important en el cost de la infrastructura d'algunes línies, com han posat en relleu els estudis duts a terme en un mateix traçat aplicant-hi diferents criteris de radis mínims en planta.

Per una altra banda i dins la dinàmica transversal, resulten ben coneguts els esforços de caràcter aleatori exercits pels vehicles. Aquests esforços depenen bàsicament del pes per eix, de la velocitat de circulació i de la qualitat geomètrica de la via.

Deixant de banda les repercussions d'aquest fet en el camp del material per a més endavant, i limitant-nos, ara per ara, a la incidència en l'àmbit de la superstructura de via, resulta d'interès assenyalar que el paràmetre (U) que caracteritza la qualitat geomètrica abans esmentada és donat per l'expressió:

U = 2 NT + D

essent:

NT = desviació mitjana (en mm) dels defectes d'anivel·lació transversal, sobre una longitud de 300 m de via.

D = desviació mitjana (en mm) dels defectes d'alineació sobre una longitud de via anàloga.

Tots dos paràmetres (NT) i (D) s'obtenen a partir dels resultats obtinguts pel vehicle d'auscultació de via.

La relació existent entre U i el grau de qualitat de la via queda expressada al quadre adjunt:

U (mm)	Qualitat de via
2 a 2,5	Molt bona
3 a 3,5	Bona
4 a 5	Mitjana
6	Mediocre

A les línies d'alta velocitat s'assoleixen fins i tot valors d'U inferiors, fins d'1,5 mm.

Es constata, conseqüentment, que l'increment de velocitat comporta una certa exigència major respecte a la qualitat geomètrica de la via.

2.3. Fenòmens aerodinàmics

L'increment de les velocitats de circulació comporta l'aparició d'un

conjunt de fenòmens aerodinàmics que com més augmenta la velocitat més importància adquireixen. Aquests fenòmens es presenten, en síntesi, quan dos vehicles s'encreuen a l'aire lliure o a l'interior de túnels, o bé quan una composició es desplaça aïlladament recorrent la línia.

La manifestació pràctica d'aquests fenòmens es reflecteix en els problemes que ocasionen en relació amb:

a) l'estabilitat transversal dels vehicles.

b) el confort dels viatgers.

En el primer cas es podrien presentar, almenys teòricament, dificultats amb la trencadissa dels vidres de les finestres dels vehicles i també relatius a la possibilitat que bolquessin.

En el segon cas, la inconfortabilitat dels viatgers pot provenir d'haver superat els valors absoluts d'increment de pressió que l'ésser humà pot suportar sense notar cap molèstia o bé pot ser causada per la variació relativa de pressió en la unitat de temps.

En conseqüència, les investigacions efectuades durant les dues darreres dècades han tingut com a objectiu precisar els límits d'inconfortabilitat dels viatgers (quadre 4) i deduir-ne, conseqüentment, les disposicions constructives tant a la via com en el material que permetin de no superar els límits esmentats.

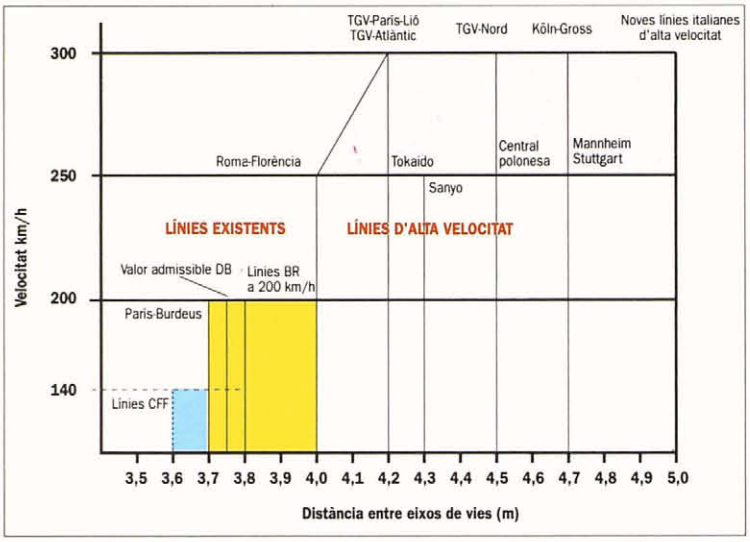
Quadre 4

Influència de les variacions de pressió en la sensibilitat de l'oïda humana

Sensibilitat de l'oïda	Diferències de pressió a l'interior i a l'exterior de l'oïda (kg/m²)
Lleugera sensació d'obturació de l'orella	40 a 70
Creixent sensació d'obturació	70 a 130
Sensació forta d'obturació i capacitat de percepció reduïda	130 a 200
Molèstia molt marcada, dolor lleuger	200 a 400

Fig. 4

La velocitat i la seva relació amb l'entrevia



Referent a les circulacions a l'aire lliure i als efectes d'aquesta intervenció, la decisió adoptada ha concernit l'increment de l'entrevia (o distància entre els eixos de les dues vies).

Efectivament, els valors adoptats històricament per a aquest paràmetre se situaven en l'interval dels 3,6 a 3,8 m, el qual es mostrà insuficient quan les velocitats començaren a aproximar-se als 200 km/h.

La construcció de línies d'alta velocitat ha obligat a un increment substancial d'aquest valor i s'ha arribat fins a quasi 1 m més d'entrevia en alguns itineraris, sense que hi hagi un criteri únic sobre la magnitud que cal retenir. La fig. 4 mostra els criteris adoptats per a algunes relacions destinades a ésser recorregudes a alta velocitat. Tingueu present com queda definit el nou interval de variació, en el seu límit inferior, pels 4 m d'entrevia de la nova línia Roma-Florència (projectada a final de la dècada dels anys 60); i en el seu límit superior, pels 5 m amb què els ferrocarrils italians projecten construir l'extensió de la seva xarxa d'alta velocitat.

Cal subratllar també l'evolució experimentada pels ferrocarrils francesos, passant dels 4,20 m amb què es projectà la línia París-Lió a mitjan dècada dels 70, fins als 4,5 m amb què es dissenyen les noves línies Lió-Valence i TGV-Nord. Aquest fet origina que la secció transversal de la línia hagi passat dels 13 als gairebé 14 m.

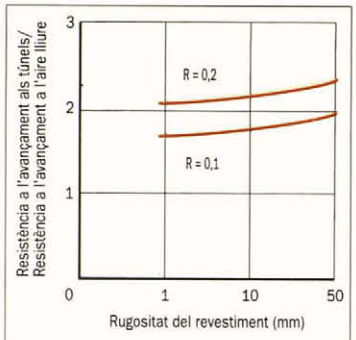
Pel que fa a la circulació a l'interior dels túnels, els problemes aerodinàmics han repercutit en la secció d'aire lliure que resulta necessari disposar per evitar que les variacions de pressió, tant en termes absoluts com en relatius, no afectin sensiblement el confort del viatger.

S'ha passat per aquest motiu de seccions, per a via doble, de l'ordre de 40 a 50 m² a les línies construïdes durant el segle passat, a seccions a l'entorn dels 70 m² a les línies d'alta velocitat. Tanmateix, igual que passa amb l'entrevia, l'interval de variació és ampli, ja que oscil·la des dels 60 m² amb què fou projectada la línia Roma-Florència, fins als 82 m² de les línies d'alta velocitat alemanyes, passant pels 71 m² adoptats a la línia TGV-Atlàntic. La tendència és, tanmateix, d'incrementar la secció, en previsió de circulacions per damunt els 300 km/h, fins a valors pròxims a 90 m². D'una manera molt superficial es pot dir que el cost d'aquests nous túnels de 90 m² de secció, seran un 30% més cars que els de 60 m².

El quadre 5, sintetitza els principals criteris adoptats per les com-

Fig. 5

Influència de la rugositat del revestiment en la resistència a l'avançament



K = 50: Amb afloramen de roca

K = 10: Paredat

K = 1: Formigó llis

panyies FS, DB I SNCF per al disseny de les línies d'alta velocitat.

Un aspecte que és d'interès d'esmentar és el corresponent a la necessitat de revestir els túnels amb independència o no de consideracions estructurals, a causa de la seva incidència en l'increment de les resistències a l'avançament (fig. 5).

2.4. Resum d'algunes característiques diferenciadores d'una via fèrria per a alta velocitat.

La impossibilitat de desenvolupar en l'espai de temps disponible tota la problemàtica de la interacció via/vehicle, ens ha dut a seleccionar algunes de les qüestions que presenten un interès més gran. Tanmateix, al quadre 6, s'hi han sintetitzat les principals característiques que afecten de manera diferenciadora els components de l'estructura i de la infrastructura ferroviària, a les línies d'alta velocitat.

3. Condicionments de qualitat en relació amb el material ferroviari

De manera anàloga a aquella amb què s'abordà el tema dels condicionaments de qualitat de la infrastructura i superstructura de via, els aspectes relacionats amb el material ferroviari seran desenvolupats a partir de consideracions sobre els fenòmens de

Quadre 5

Magnituds adoptades per les principals administracions ferroviàries pel que fa a alguns paràmetres de disseny de línies d'alta velocitat

PARÀMETRE	ADMINISTRACIÓ		
	DB	FB	SNCF
Velocitat màxima de disseny de línia (km/h)	300	Línia Roma-Florència 250 Noves línies d'alta velocitat 300	Línia París-Lió 300 Línia TGV-Atlàntic 320 Línia TGV-Nord 350
Velocitat total màxima decidida per a l'explotació comercial (km/h)	**1a. fase**: 200 **2a. fase** (a partir de 1991): 250 **3a. fase** (sense data fixada): 300	**1a. fase**: 200 **2a. fase** (a partir de 1988): 250 **3a. fase** (a partir de 1993): 300 per les noves línies	París-Lió: 270 (a partir de -) TGV-Atlàntic: 300 (a partir de setembre 1989) TGV-Nord: 320 (a partir de 1993) Lió-Valence: 320 (a partir de 1994)
Tipologia de tràfics per a la nova línia	**1a. fase**: Tràfic mixt **2a. fase**: Viatgers amb V màx. = 250 km/h i Mercaderies amb Vmàx. 80 km/h.	**1a. fase**: Tràfic mixt **2a. fase**: Viatgers amb V màx. = 250 km/h i Mercaderies amb Vmàx. = 80 km/h	**Viatgers** a 270 París-Lió 300 al TGV-Altàntic 300/320 al TGV-Nord i Lió-Valence
Radis mínims en planta, peralt màxim, excès de peralt, i acceleració centrífuga sense compensar (o insuficiència de peralt)	R mínim. = 700 m (excep. hmàx. = 150 mm Emàx. = 30 mm I = 50 mm (excepc: 80 mm)	**1r. tram:** Roma-Chiusi * Rmínim. 3.000 m * Emàx. = 125 mm (per a V= 100 km/h) **2n. tram** : Chiusi Florència * Rmínim. = 3.900 m * hmàx. = 105 mm sc = 0,65 m/s² I = 92 mm	**París-Lió** * Rmínim. = 4.000 m (excepc = 3.200 m) I = 85 mm **TGV-ATLÀNTIC** * Fmínim. = 4.200 m (excepc = 4.000 m) * hmàx. = 180 mm * I = 85 mm **TGV-Nord i Lió** * Rmínim. = 6.000 m (excepc = 4.000 m)

PARÀMETRE	ADMINISTRACIÓ		
	DB	FS	SNCF
Entrevia	4,70 m	**Roma-Florència:** **Noves línies**: 4 m Vmàx.= 250 km/h = 4,60 m Vmàx.= 300 km/h = 5 m	París-Lió i TGV-Atlàntic: 4,2 m TGV-Nord i Lió-Valence: 4,5 m
Secció transversal del túnel	Alineació: Recta: 81 m² Corba: 87 m²	Roma-Florència: 60 m² Noves línies: 76 m²	TGV-Atlàntic: 71m² Valence (sense definir = 90 m²)
Longitud transversal de la plataforma	13,70 m	12,60 m per a V màx.= 250 km/h 13,00 m per a V màx.= 300 km/h	París-Lió 13 m TGV-Atlàntic TGV-Nord 13,9 m
Rampa màxima	12,5%	Roma-Florència: 8% (7,5% als túnels) Noves línies: 18‰ (15% als túnels)	París-Lió i Lió-Valence 35% TGV-Atlàntic i TGV-Nord 25%

* La inexistència d'uniformitat de criteris en la definició de longitud transversal de la plataforma, aconsella de reproduir gràficament (vegeu figures 6 i 7), les seccions tipus de cada xarxa a fi d'evitar errades

dinàmica vertical i transversal. A més, incorporarem també els condicionants que es deriven dels fenòmens aerodinàmics en forma d'increment de les resistències a l'avançament.

3.1 Dinàmica vertical

L'expressió matemàtica (1) descrita a l'apartat 2.1, permet de deduir l'interès de reduir el pes no suspès dels vehicles per mantenir acotades les sol·licitacions verticals que hi exerceixen.

S'ha arribat d'aquesta manera a la situació de referència següent, a títol indicatiu:

* Locomotora clàssica (V màx. = 200 km/h)

$$m \simeq 1{,}6 \text{ t/roda}$$

* TGV (V màx ≃ 300 km/h)

$$m \simeq 0{,}8 \text{ t/roda}$$

que ha estat assolida entre d'altres aspectes, mitjançant modificacions constructives introduïdes respecte a la ubicació dels motors de tracció.

D'altra banda, de l'expressió matemàtica (2), apartat 2.1, es dedueix, també, l'interès de reduir les càrregues nominals, raó per la qual s'ha passat de les 10 a 11 t/roda en vehicles quan circulen fins a 200 km/h, a 8/8,5 tones per roda en vehicles aptes per a assolir els 300 km/h. Una justificació possible d'aquestes magnituds podem fer-la, segons la nostra opinió, a partir de les consideracions que sobre la dinàmica transversal d'aquelles càrregues, efectuem en l'apartat següent.

3.2. Dinàmica transversal

La circulació d'un vehicle per una via, hi genera al damunt uns esforços transversals de caràcter aleatori, la magnitud dels quals presenta una envoltant superior definida matemàticament per l'expressió:

$$\frac{PV}{1.000}$$

essent P el pes per eix del vehicle i V la velocitat de marxa.

Si desitgem que les sol·licitacions d'aquesta natura es mantinguin en el mateix ordre de magnitud quan se circula a alta velocitat, hauria de verificar-se la relació aproximada:

$$P.V \simeq P' \, V'$$

essent P i V el pes per eix normalment utilitzat per a una velocitat màxima de V (km/h) i (P', V') les variables anàlogues en alta velocitat.

Atès que habitualment es té:

màx. = 22 t/eix per a Vmàx. = 200 km/h

es dedueix que el pes màxim dels vehicles que circulen a alta velocitat (270/300 km/h) hauria de trobar-se al voltant de:

$$P' \simeq \frac{22 \times 200}{270 \times 300} \simeq 16 \text{ a } 15 \text{ t/eix}$$

La xifra de 16 t/eix és, com és sabut, la que correspon a les branques franceses TGV.

S'obtenen, per tant, càrregues per roda pròximes a 8t i hem justificat, almenys parcialment, la

Quadre 6
Quadre resum de característiques diferenciadores d'una via fèrria per a alta velocitat

Factor	Magnituds	Observacions
Carril	UIC 60 enfront de 54 kg/ml Defecte de 0,3 mm en λ d'1,7 a 1,8 m enfront a 1mm	Per a una millor conservació via Per incidència en acceleracions de les caixes de greix
Subjecció	Freqüència pròpia > 1.500 Hz	A 300 kms/h, la freqüència de vibració del carril > 1.500 Hz
Placa elàstica	Gruix de 9 mm enfront de 4,5 mm	Capacitat més gran d'amortiment de les vies
Travesses	Àrea més gran de suport	Influència positiva en la reducció de despeses de conservació Incidència en esforços transversals. Pes més gran (245 enfront de 200 kg)
Balast	Menys valor. gruix més gran (35 enfront de 20 o 25 cm)	Més possibilitats d'atrició a A.V. Capacitat més gran d'amortiment
Plataforma natural	Capacitat portant més gran Tractament en accessos a ponts	Disminució dels assentaments diferencials
Pont	De formigó enfront de metàl·lics	Disminució rigidesa vertical Menys soroll transmès Estores elàstiques. Reduir abrasió de la capa de balast i disminuir sorolls (≃ 7 a dB (A)
Túnels	Més gran S transv: 60 a 80 m² enfront de 40 o 45 m² Revestiment formigó	Reduir efectes de Δp en el viatger. Disminuir irregularitats i per tant resistències a l'avançament
Aparells de via	De cor mòbil enfront de l'existència de canvis amb llacuna als cors	Millorar la seguretat de la circulació
Peralt de la via	De 180 mm enfront de 160 mm	Per a reduir el desconfort del viatger
Radi de corba	R > 3.000 m enfront a R = -1.260 m (per de 160 km/h)	Reduir efectes força centrífuga
Entrevia	4,20 a 4,70 m enfront de 3,80 m	Reduir efectes aerodinàmics en el viatger

magnitud indicada a l'apartat anterior per a aquest paràmetre.

Un major aprofundiment en l'anàlisi de les accions transversals exercides pels vehicles durant llur marxa, permet d'afirmar que la seva magnitud depèn de diversos paràmetres constructius, la influència dels quals és del tipus:

$$F = f\left(\frac{1}{L}, \frac{1}{r}, \quad \right)$$

essent:

F = esforç transversal

L = empatament del bògie

(= distància entre eixos)

r = radi de les rodes

Se'n dedueix l'interès que té augmentar l'empatament dels bògies, a fi de reduir les sol·licitacions transversals. En aquest sentit s'assenyala que els bògies utilitzats normalment fins a 200 km/h tenen un empatament o distància entre els seus eixos que no supera els 2,6 m, davant els 3 m que hi ha als bògies del TGV francès.

Quant a la magnitud del radi de les rodes, no es pot dir que l'alta velocitat hi hagi originat modificacions substancials, atès que els valors utilitzats en aquest nivell de prestacions (2r = 0,9 m) coincideixen amb els que hi ha al material apte per a 200 km/h.

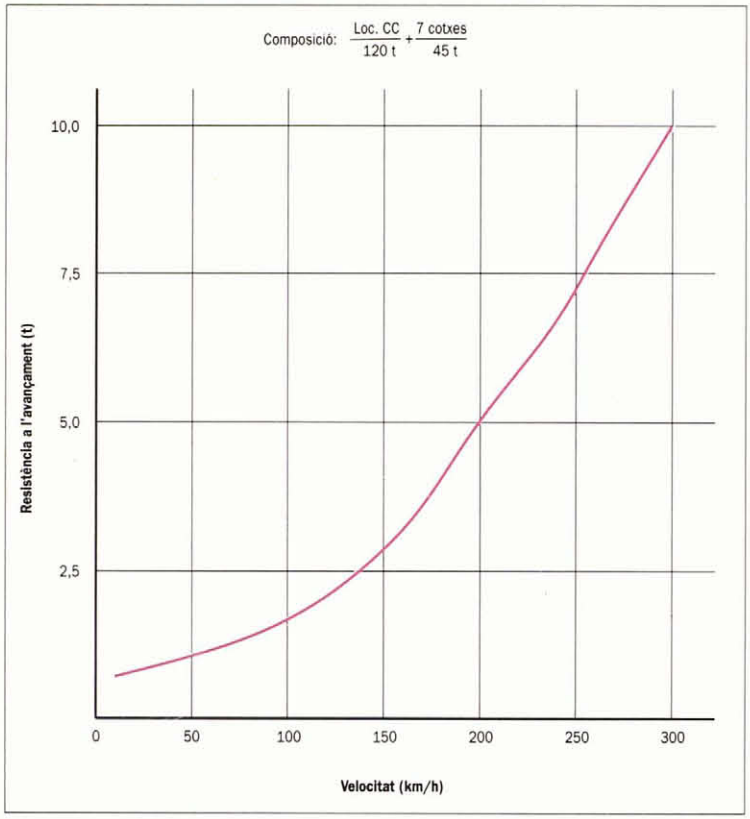
3.3 Fenòmens aerodinàmics

Les primeres experiències fetes amb material convencional, locomotora més cotxes remolcats, a velocitats superiors a 200 km/h, van fer palès l'augment important de les resistències a l'avançament que hi ha quan se supera la velocitat esmentada, tal com mostra el gràfic de la fig. 6.

S'observa que el pas de 200 a 250 km/h significa una elevació de les resistències de prop del 50%, valor que és de bona avinença amb els resultats que proporciona la fórmula clàssica de les resistències R a l'avançament.

$$R = a + bV + cV^2 \quad (3)$$

Fig. 6
Variació de la resistència a l'avançament amb la velocitat (Nouvion, 1970)



L'aplicació de l'expressió precedent al cas del material motor convencional condueix a una relació del tipus:

$$R = 150 + 1{,}2\,V + 0{,}03\,V^2 \; *$$

per a una locomotora de sis eixos de la qual es dedueix, per tant, quan anem substituint alguns valors de V que puguin servir com a referència, la importància del terme V en el valor de la resistència total.

V (km/h)	Resistència total (kg)	Percentatge a causa del terme V^2
100	570	53 %
150	1.005	67 %
200	1.590	75 %
250	2.325	80 %

* Fórmula emprada per RENFE

És raonable, en conseqüència, intentar de reduir les resistències a l'avançament a fi d'evitar, aspectes com ara la necessitat de disposar de potències motrius molt elevades.

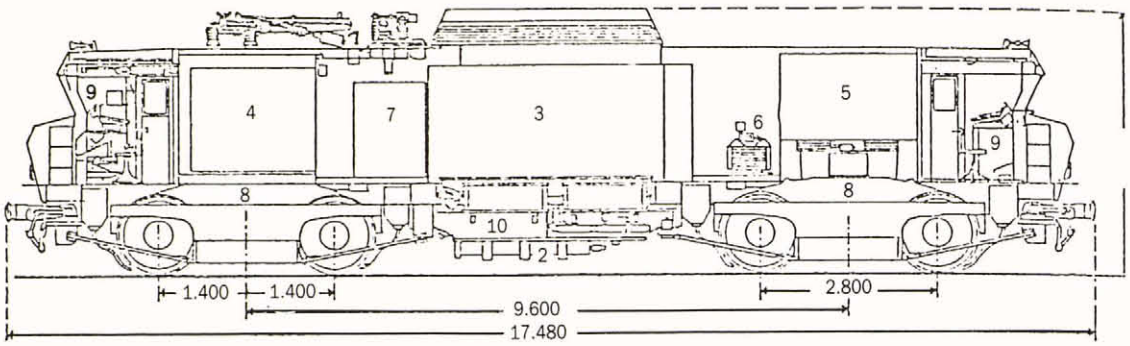
Les investigacions efectuades a partir de la llei general (3) de variació de R amb V, se centraren, per això, a mitjan dels anys 70, amb motiu de la fabricació dels primers prototipus de trens d'alta velocitat, a conèixer la relació de dependència existent entre el paràmetre C i alguns dels paràmetres constructius del material.

En tot cas i abans d'exposar la relació matemàtica de dependència de C respecte dels paràmetres esmentats, cal assenyalar que el terme CV^2 representa la resistència produïda pels factors següents:

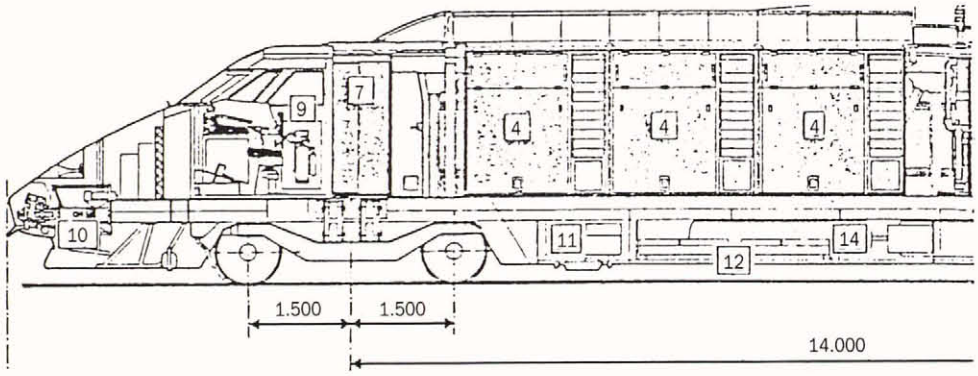
- La pressió de l'aire sobre la superfície frontal del primer vehicle.
- El moviment dels blens d'aire a través de les parets del tren.

Fig.7

Secció transversal locomotora tipus per a V < 200 km/h



Secció transversal del TGV: V > 200 km/h



- La depressió que es produeix al seu extrem.
- Els remolins que tenen lloc a l'espai lliure entre dos vehicles consecutius.
- Les irregularitats existents a les parets del tren (portes, finestres, etc.).

Podem afirmar, per tant, que la resistència aerodinàmica es veu afectada de manera important per la geometria externa dels vehicles i per la seva continuïtat.

Les experiències dutes a terme per la SNCF, permeteren a Bernard et al. (1976) d'obtenir una expressió general de variació del coeficient C, en la forma:

$$C = K_1 S + K_2 . [p L + (n-1) \Delta L] + 0{,}0021 N \quad (4)$$

essent:

K_1 = paràmetre que depèn de la forma de la part davantera i posterior del tren.

S = superfície frontal del tren.

P = perímetre parcial comptat de carril a carril.

K_2 = paràmetre dependent de la rugositat de les superfícies laterals.

L = longitud total de la composició.

N = nombre de pantògrafs.

ΔL = longitud equivalent a causa de l'espai lliure existent entre vehicles.

Pel que fa al disseny del material per a alta velocitat, l'expressió (4) ha permès l'adopció de decisions de gran interès.

1a.) *Adopció d'un perfil aerodinàmic en els vehicles extrems.*

(per a disminuir el valor de K)

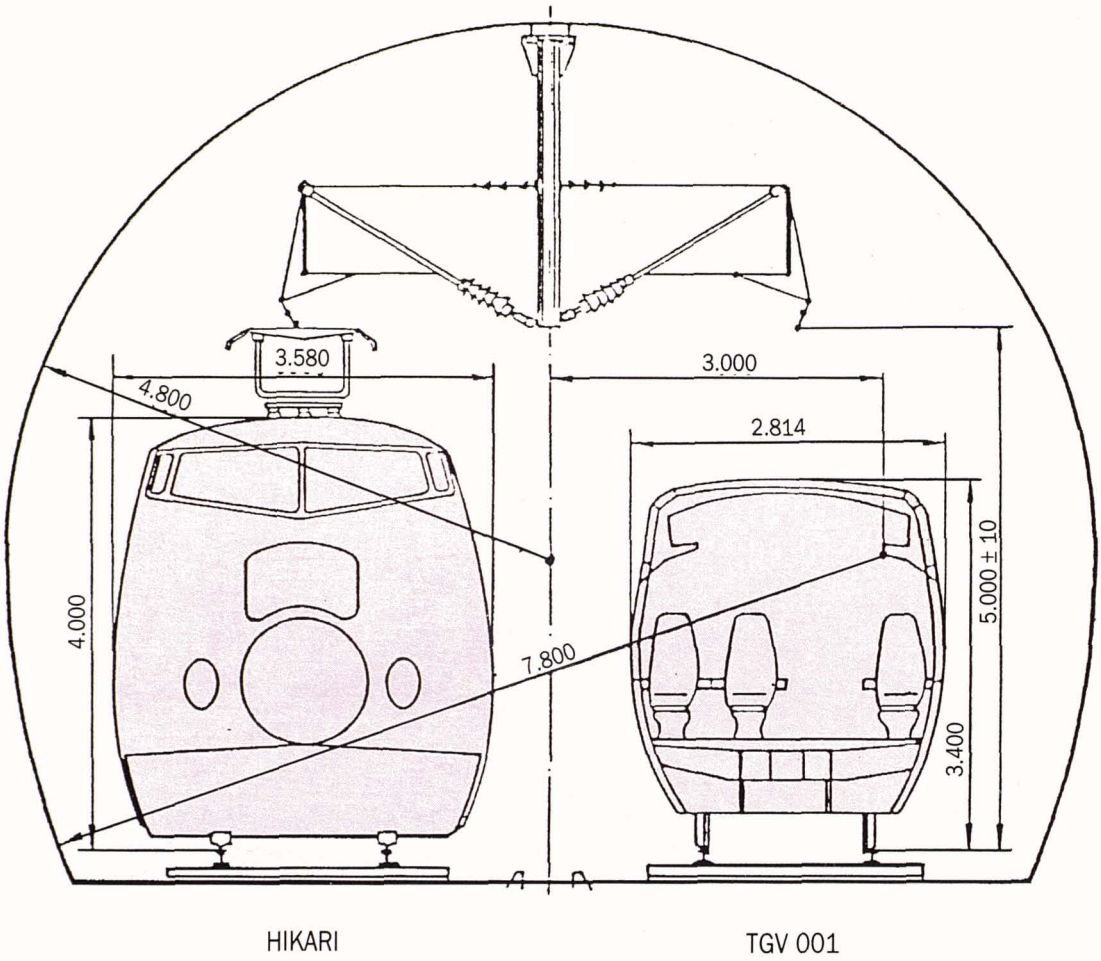
Aquesta disposició, tal com pot comprovar-se a la fig. 7, no és habitual en el material ferroviari que circula fins a 200 km/h, el qual no té, realment un perfil aerodinàmic.

2a.) *Disminució de la superfície frontal del tren (S)*

La secció transversal d'una locomotora és de prop de 10 m, mentre que els assaigs efectuats

Fig.8

Comparació gràfica dels perfils en relació amb la secció del túnel del Tokaido nou



per la SNCF han permès d'optimitzar S (tenint present que és un problema en què, a més de l'aerodinàmica, confluueixen uns quants aspectes més: espai per als viatgers, altura d'aquests, etc.).

En aquest sentit, la branca TGV té per a S un valor de ≃ 9 m, a comparar amb el corresponent a les primeres branques de la línia Tokaido que tenien ≃ 12 m (fig. 8).

3a.) *Disminució de la rugositat de les superfícies laterals dels vehicles* k_2

Sobre aquest factor ja s'havia actuat amb motiu de la posada a punt del material apte per a 200 km/h, entaforant, per exemple la maneta d'obertura de portes a les mateixes portes.

4a.) *Disminució de* ΔL

La disminució dels remolins que es formen a l'espai existent entre dos vehicles consecutius, dugué a l'adopció del sistema de caixes articulades (fig. 9) i afavorí, a més, el confort del viatger evitant que la ubicació de qualsevol seient correspongués a la vertical del bògie.

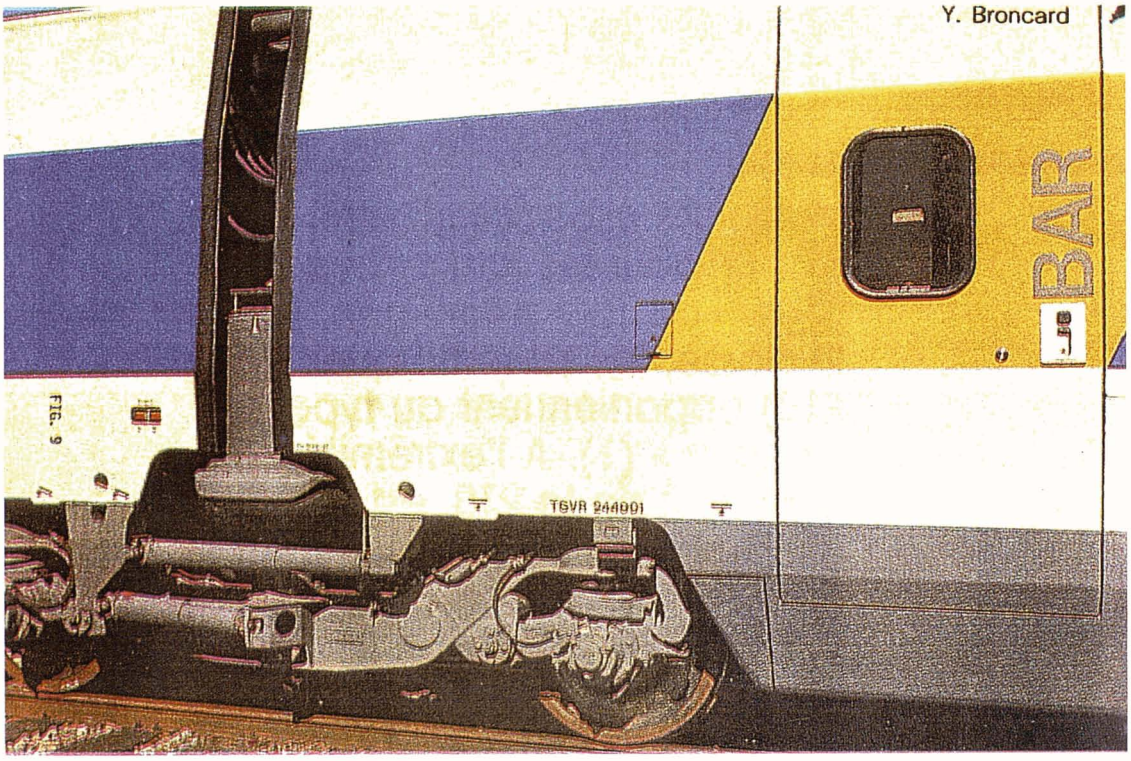
Cal reconèixer que aquesta solució ja havia estat adoptada pel tren Talgo els anys 50. En fou, per tant, el pioner i precursor de la disposició constructiva adoptada vint anys després pel TGV o l'APT anglès.

5a.) *Actuació sobre la longitud total del tren (L)*

La influència de la longitud total de les composicions ferroviàries ha estat quantificada mitjançant múltiples assaigs, tenint present la seva incidència en la resistència per fricció a l'interior dels túnels.

En tot cas la capacitat necessària de transport pot ser un condicionament de primer ordre. A títol indicatiu, al quadre adjunt

Fig.9



s'indiquen alguns valors de referència.

Tipus de tren	Longitud total (m)
Locomotora + 15 cotxes	410
TGV París - sud-est	200
TGV Atlàntic	237
Hikari	280

Les disposicions constructives precedents han donat com a resultat que el consum energètic dels trens d'alta velocitat, 260/270 km/h no sigui superior al dels trens convencionals a 160/200 km/h.

4. Condicionaments de qualitat en relació amb l'explotació tècnica i comercial de les línies d'alta velocitat

L'explotació tècnica i comercial d'una línia d'alta velocitat es troba guiada pels mateixos criteris bàsics que regeixen l'explotació d'itineraris en què les prestacions màximes són inferiors.

Aquests criteris fonamentals són: la seguretat i la fiabilitat. El primer s'emmarca dins l'explotació tècnica i el segon s'inscriu més aviat en l'explotació comercial, amb el significat pràctic d'assegurar l'acompliment sempre i al màxim nivell, de les prestacions comercials ofertes i, de manera particular, l'acompliment, tant en la sortida com en l'arribada, dels horaris fixats prèviament.

Un dels factors que intervé de forma principal en l'aconseguiment de la seguretat tècnica és el sistema de senyalització amb què sigui equipada la línia.

L'alta velocitat introdueix en aquest àmbit una diferència notable en relació amb les línies en què se circula a velocitats màximes de 200 km/h, ja que l'alta velocitat requereix una indicació permanent a la cabina de la velocitat a la qual s'ha de circular a cada moment.

De fet, la circulació a alta velocitat es regeix, en matèria de senyalització, per un conjunt de principis universalment acceptats i que fonamentalment són:

1) *Abandó de la senyalització lateral,* és a dir, de la utilització de senyals col·locats al costat de la via, per raó de dues causes:

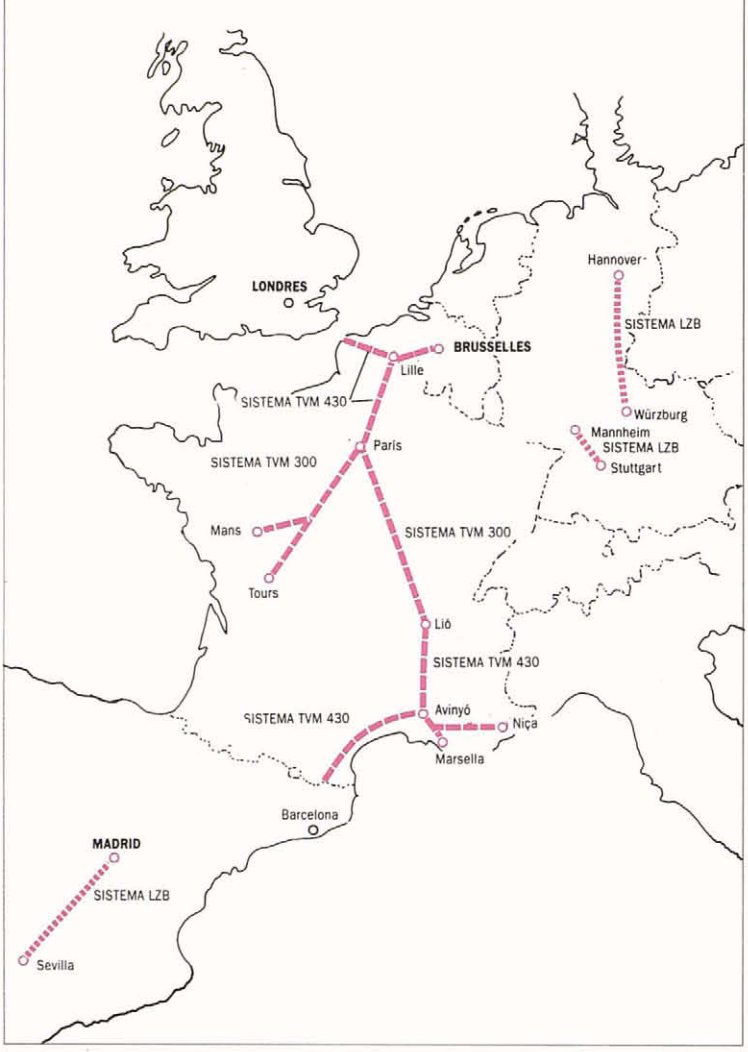
a) La impossibilitat per al conductor, quan circula a alta velocitat i en presència de condicions climatològiques adverses, d'observar amb precisió la indicació del senyal lateral.

b) L'important augment de les distàncies de parada (1.500 m per a 160 km/h i fins més de 5.000 a 270 km/h), la qual cosa ens conduiria, si de cas adoptàvem cantons d'aquesta longitud, a una reducció important de la capacitat de la línia.

2) *Necessitat imperiosa d'indicar, al lloc de conducció, la velocitat de circulació.*

3) *La senyalització no ha d'és-*

Fig. 10
Estat actual de desenvolupament i previsió dels sistemes de senyalització per a alta velocitat



ser solament indicativa sinó que també ha d'ésser imperativa, és a dir associada a un control de velocitat que desencadeni la frenada automàtica quan la velocitat real superi la velocitat que calgui dur a cada secció de la línia.

Actualment hi ha dos sistemes, bàsics, de senyalització a les línies d'alta velocitat:

a) *El sistema francès, denominat TVM* (transmissió via màquina) en les seves versions TVM 300 i TVM 430, que utilitza el carril com a via per a la transmissió de la informació.

b) *El sistema alemany,* denominat LZB (acció sobre els trens en línia) que utilitza un cable conductor ubicat a l'eix de la via per a la transmissió de la informació).

La fig. 10 mostra l'estat actual de desenvolupament de cadascun dels esmentats sistemes a les diferents línies d'alta velocitat projectades o construïdes a Europa. És interessant de destacar la decisió recent d'instal·lar al túnel del Canal de la Mànega el sistema francès de senyalització TVM 430.

Des del punt de vista econòmic, la incidència de la substitució de la senyalització lateral per la senyalització contínua a la cabina, se situava, segons un estudi que realitzàrem el 1987, en els següents ordres de magnitud:

* Senyalització lateral. Bloqueig automàtic lluminós ≈ 20 MPTA/km

* Senyalització contínua en cabina. Dades corresponents a la línia París-Lió ≈ 30 MPTA/km

Pel que fa a la fiabilitat de l'explotació, s'assenyala que és un dels aspectes de major importància en una línia d'alta velocitat (prescindint de la seguretat).

La possibilitat d'assegurar d'una manera permanent les prestacions comercials que, en temps de viatge especialment, ofereix l'alta velocitat, constitueix un dels reptes més importants que el ferrocarril té plantejats.

L'expressió: "la qualitat superior justifica un preu més elevat", que resumia el resultat d'una enquesta feta per la SNCF el 1982 amb motiu de la posada en servei de la nova línia París-Lió, era alguna cosa més que una frase, era declarar que si s'abona més per un producte, aquest ha de respondre a allò que s'ha ofert.

Així, l'explotació de la línia francesa d'alta velocitat, aconseguia que el 98% dels trens en aquella línia arribessin amb retards inferiors a 14 minuts.

La necessitat d'aconseguir cotes de qualitat encara superiors fou la principal raó que mogué la SNCF a elevar la velocitat punta de 260 a 270 km/h poc temps després de l'obertura de la línia referida. Malgrat aquests esforços, no cal dir que el ferrocarril està exposat, com a sistema de transport, a la possibilitat que es produeixin incidències que poden afectar la qualitat de l'explotació.

Entre aquestes incidències podem esmentar, a títol indicatiu, l'error parcial en la tracció de les branques, problemes en relació amb els dispositius automàtics de tancament i d'obertura de portes, etc., per no esmentar sinó alguns dels que realment s'han produït.

En aquelles situacions el ferrocarril ha de tenir prou capacitat de reacció perquè la incidència produïda pertorbi tan poc com sigui possible la resta de les circulacions.

Fig. 11

Disposició esquemàtica dels escapadors i vies d'apartat a la línia TGV Atlàntic

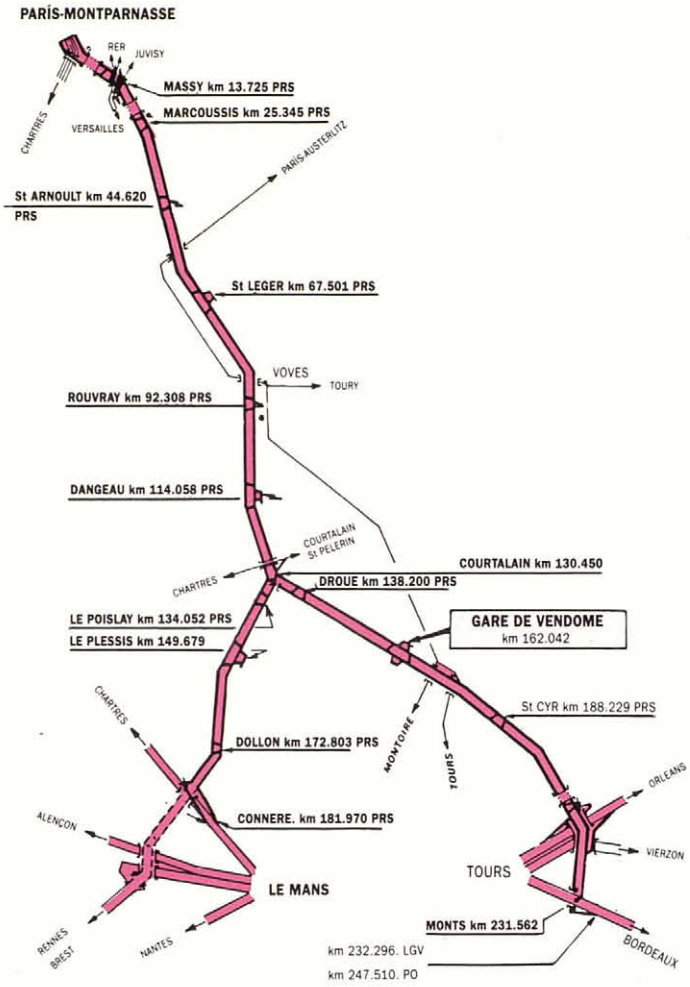
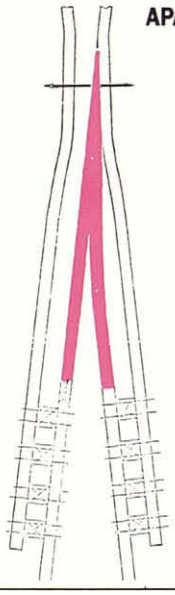
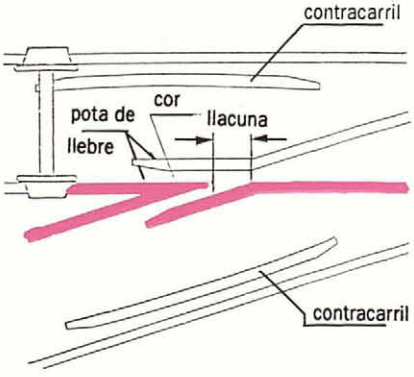


Fig. 12



APARELLS DE COR MÒBIL

APARELLS DE COR FIX



Atenent aquesta idea es dissenyen a les línies d'alta velocitat, com a element diferenciador:

a) *Escapador o via de tirades,* que permetin el pas d'una via a una altra (aproximadament cada 20-30 km), a velocitats no radicalment diferents de les autoritzades a la via general.

S'ha arribat, d'aquesta manera, a disposar d'equips que permeten el pas per via desviada a 160 km/h (davant els 60 km/h que acostumen a ser normals a les línies no dedicades a l'alta velocitat).

b) *Vies d'apartament o d'avançament* que, com el seu nom indica, permetin la paralització temporal d'alguna composició o bé la ubicació dels equips de manteniment de la línia.

Aquestes vies se solen situar, aproximadament cada 50 km.

A la fig. 11 es mostra la disposició esquemàtica d'escapaments i de vies d'apartament a la línia TGV-Atlàntic inaugurada el setembre de 1989.

Però la necessitat de disposar d'aparells de via que permetin la circulació per una via desviada a velocitats elevades (130-160 km/h a la DB i SNCF respectivament) obliga a emprar aparells de cor mòbil (fig. 12) que milloren la seguretat de les circulacions i eleven el confort del viatger.

La incorporació dels aparells de via esmentats pot arribar a representar un cost econòmic superior al 100% en comparació amb aparells més convencionals dotats de cor fix.

Quadre 7

Influència de l'alta velocitat en viatgers, en les necessitats d'instal·lacions i material mòbil

Àrea	Instal·lacions de material necessari per a velocitats		Justificació
	V < 200/220 km/h	V > 200/220 km/h	
Via	Qualitat geomètrica de la via menys exigent - Toleràncies puntuals	Qualitat geomètrica de la via més estricta - Toleràncies puntuals - Toleràncies globals (Desviació típica dels defectes)	Influència dels defectes a les sobrecàrregues dinàmiques i en el confort del viatger amb l'augment de velocitat
Instal·lacions de seguretat	Senyalització lateral	- Senyalització contínua en cabina - Centre de control de la circulació	- Dificultats de percepció de senyals fixes - Seguretat de la circulació
	Estimació econòmica *		
	Senyalització lateral. Bloqueig automàtic Iluminós Cost aprox. 20 MPTA/km	- Senyalització contínua en cabina. Cost aprox. (a la línia París-Lió) 30 MPTA/km	
Captació de corrent	Sistema elèctric a 1.500 o 3.000 V en c.c. i a 15.000 o 25.000 V en c.a.	Sistema d'electrificació preferible: corrent alterna a 25.000 V	**Tècniques**: Intensitats elevades absorvides **Econòmiques:** Sobrecost elevat d'instal·lació i explotació
Material motor i remolcat	Locomotora amb P màx. = 20/22 t/eix Composicions: Loc + cotxes remolcats	Pes màxim per eix volgut: 16/17 T Branques autopropulsades	Necessitat de mantenir els costos de conservació entre els límits corresponents a les línies clàssiques
	Estimació econòmica *		
	Locomotora + sis cotxes 1a classe: 60 places 2a classe: 88 places Total de places: 482 Cost de la locomotora: 350 MPTA Cost dels cotxes: 100 MPTA Cost total: 950 MPTA	Branca autopropulsada Evolució econòmica de les branques TGV-Atlàntic Nre. places: 500 1a classe: 116 2a classe: 384 Cost branca: 1.500 MPTA	- Tracció disseminada en un cert nombre d'eixos

* Condicions econòmiques 1986/1987

5. Síntesi

Aquesta exposició ha tingut com a finalitat fer un repàs ràpid i sintètic d'algunes de les diferències que l'alta velocitat introdueix respecte a les línies de ferrocarril explotades amb prestacions menors.

S'ha posat de manifest que l'alta velocitat exigeix, en determinats camps, uns condicionaments de qualitat superiors als que fan falta en aquelles línies en què la velocitat màxima no supera els 200 km/h.

Però hem destacat el fet que amb aquests nous condicionaments, el ferrocarril aconsegueix de disposar d'uns traçats, unes instal·lacions i un material que en conjunt proporcionen uns costos d'explotació que com que se situen en intervals pròxims als corresponents a les línies tradicionals, permeten d'aprofitar més bé els avantatges que, en termes econòmics, signifiquen la captació d'una quantitat més gran de viatgers a causa de les importants reduccions de temps de viatge que s'hi aconsegueixen.

En conclusió i a manera de síntesi, al quadre 7 s'ofereix una visió esquematitzada de la influència de l'alta velocitat en les necessitats d'instal·lacions i de material.