

*"Les ingénieurs de chemins de fer, au début de leur carrière, se demandent parfois comment le petit obstacle constitué par le mentonnet des bandages suffit pour empêcher les déraillements".*

MARIÉ

## Lo svio Cento e più anni di ricerche su un problema complesso Gli inizi e la scuola francese

Dott. Ing. Massimiliano BRUNER<sup>(\*\*)</sup> - Prof. Ing. Giuseppe Romolo CORAZZA<sup>(\*)</sup> - Dott. Ing. Emilio COSCIOTTI<sup>(\*\*)</sup>

**SOMMARIO** – Primo articolo di una serie dedicata al problema dello svio. Viene analizzata storicamente la vasta letteratura tecnica su questo problema, la quale è stata suddivisa in parti omogenee riflettenti i contributi di ricercatori francesi, tedeschi, giapponesi e di gruppi internazionali. Questo lavoro è dedicato agli autori francesi POCHET, NADAL, MARIÉ e CHARTET e si conclude con una prima proposta di evoluzione degli studi sulla prevenzione dello svio, basata sui rischi statistici che lo caratterizzano e sulla sua fenomenologia dinamica.

### 1. Introduzione

Nel vastissimo settore delle ricerche sulla dinamica ferroviaria rientra un fenomeno, che è stato sottoposto a ricerche teoriche e sperimentali con continuità da più di cento anni; ciò dimostra che sia sul piano della conoscenza scientifica che dei provvedimenti tecnologici utili esistono ancora settori di ricerca e di elaborazione che esigono sforzi ulteriori.

Il problema al quale si fa riferimento è lo svio. Certamente gli studi fatti in tutto il mondo, hanno consentito grandi progressi senza tuttavia soddisfare in modo esauritivo due esigenze le quali permettono di affermare che un dato problema è risolto: la prima è quella della piena conoscenza del fenomeno, la seconda è quella della capacità di sviluppare provvedimenti tecnologici capaci di impedirlo, se i suoi aspetti, come è il caso, sono negativi.

Finora i risultati prodotti dalla ricerca riguardano invece il contenimento del fenomeno stesso. Il problema, come tanti altri, presenta caratteristiche di articolazione che vanno via via ramificandosi man mano che la ricerca procede. Pertanto se chiunque può attribuire alla parola svio un significato chiaro e semplice, e cioè il sormonto della rotella da parte di una o più ruote di un veicolo, non

è possibile formulare il problema che ne deriva in una forma completa e dettagliata, sulla quale impostare una ricerca di soluzioni che coinvolgano almeno via e veicolo. Solo per cominciare con una prima distinzione si possono mettere in risalto due aspetti fondamentali che riguardano da un lato la determinazione di limiti parametrici al di sotto dei quali lo svio dovrebbe essere impossibile e dall'altro lo studio delle cause che innescano il fenomeno e le modalità del suo compiersi.

Si è pertanto ritenuto di adottare, nel prosieguo della esposizione, la soluzione di presentare singolarmente le formulazioni e trattazioni ipotizzate dai vari autori, esercitando una azione critica e propositiva ogni qualvolta ritenuto utile. Il quadro finale che deriverà dovrà permettere una analisi che consenta di dare all'argomento "svio" la formulazione più avanzata ed una prospettiva di sviluppo della ricerca.

### 2. Le ricerche sullo svio

2.1. La bibliografia in calce a questo articolo testimonia la numerosità degli studi compiuti in varie epoche da tanti studiosi; si può stimare che i lavori in materia siano circa duecento, questi a loro volta sono fra loro interconnessi dai numerosi richiami bibliografici presenti alla fine di ogni singolo lavoro.

La bibliografia su cui si basa questo lavoro contiene tutti i lavori fondamentali sullo svio ed è sufficiente a consentire al lettore interessato tutte le verifiche e gli approfondimenti ritenuti utili. E' doveroso, in ogni caso, precisare che la scelta bibliografica operata conserva un qualche carattere di soggettività.

2.2. Fatte queste precisazioni si può cominciare con un inquadramento delle ricerche fondamentali, suddividendole in gruppi aventi una comune collocazione geografica e/o temporale, cui corrisponde, come si potrà rilevare, anche un comune indirizzo di ricerca. I gruppi in questione sono quattro:

- a) il gruppo francese che è quello più antico ed inizia alla fine dell'800;

<sup>(\*)</sup> Ordinario a.r. di Sistemi di Trazione presso "Sapienza Università di Roma" - Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade.

<sup>(\*\*)</sup> Assegnisti di Ricerca presso "Sapienza Università di Roma" - Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade.

## SCIENZA E TECNICA

- b) il gruppo tedesco, di poco più recente di quello francese;
- c) il gruppo giapponese, che prese avvio negli anni '50 con gli studi sull'alta velocità;
- d) il contemporaneo gruppo internazionale che ha prodotto anche normative obbliganti o di indirizzo in materia. Questo gruppo nasce dalle collaborazioni favorite da enti come la C.E., l'U.I.C., il T.R.B. ecc. e si sviluppa in virtù dei progressi del calcolo automatico e della sperimentazione.

2.3. Il primo gruppo costituisce materia di questo lavoro, mentre gli altri verranno trattati in un secondo tempo.

Per le dimostrazioni delle formule di seguito citate si rimanda alle fonti in bibliografia.

### 3. La scuola francese: POCHET, NADAL, MARIÉ, CHARTET

Dei quattro studiosi di cui al titolo di questo capitolo POCHET era probabilmente un funzionario del Ministero dei Lavori Pubblici, NADAL era un ingegnere degli Chemins de Fer de l'Etat, MARIÉ era alla Paris-Lyon-Mediterranée P.L.M., mentre CHARTET apparteneva alla S.N.C.F..

La collocazione temporale della loro attività può essere così definita:

POCHET	anni 1880;
NADAL	anni 1890-1900;
MARIÉ	anni 1910;
CHARTET	anni 1940.

Essi lavorarono indipendentemente, pur restando strettamente legati dal filo dei progressi che seppero generare nello studio dello svio.

E' da dire subito che mancò loro completamente lo strumento della sperimentazione e quello dei moderni strumenti di calcolo automatico, il che li costrinse da un lato a rinunciare alla verifica delle loro teorie e dall'altro ad adottare talvolta schematizzazioni oggi non più condivisibili.

E' da supporre inoltre che non dovessero godere di finanziamenti di ricerca a supporto dei loro studi ed a questo riguardo piace sottolineare che essi, operando da ingegneri protagonisti dell'attività ferroviaria, diedero prova che, anche dalla routine di mestieri consolidati, si può trarre spunto di riflessione scientifica e sviluppo di progresso e conoscenza.

Sembra infine opportuno sottolineare che il più noto fra essi è NADAL, cui viene legata generalmente la formula del limite al rapporto Y/Q; al contrario i primi tre contribuirono tutti, con apporti originali, alla sua concezione mentre cronologicamente il primo è senza dubbio POCHET [1].

### 4. POCHET

4.1. POCHET, nel suo lavoro del 1882 [1], si occupa del problema della marcia in curva e, in questo vasto ambito, trova modo di occuparsi brevemente dello svio. Purtroppo non è stato possibile consultare l'opera originale di POCHET, tuttavia si è ritenuto sufficiente utilizzare quanto riassunse il BAJOCCHI [17] che a quell'opera faceva ampio riferimento nonché a ciò che espone MARIÉ nel suo trattato<sup>(1)</sup>.

POCHET, in relazione allo svio, considerò dapprima una ruota isolata in contatto con il bordino contro la rotaia secondo gli schemi piani di fig. 1a e 1b, rispettivamente utilizzati da NADAL e MARIÉ. Egli ipotizzava che questa ruota si fosse sollevata per qualche ragione di 2-3 mm, in modo da evitare il contatto sulla fascia di rotolamento. Perché la ruota possa riprendere la sua posizione normale, annullando cioè il sollevamento, occorre che sia verificata la condizione:

$$\frac{Y}{Q} \leq \frac{\operatorname{tg}\beta - f}{1 + f \cdot \operatorname{tg}\beta} \quad (1)$$

Nella (1) si sono utilizzati i simboli ora generalmente accettati per la spinta di bordino Y, il carico per ruota Q, l'angolo del bordino  $\beta$  ed il coefficiente d'attrito f. Poiché i simboli cambiano da un autore all'altro, si utilizzerà un'unica simbologia per tutti gli autori, salvo al par. 7. per quanto riguarda la teoria di CHARTET.

Considerare una ruota isolata come fece inizialmente POCHET significa fare astrazione da quanto accade sulle altre ruote di un rotabile. POCHET si rese conto di questa limitazione e del peso che poteva avere nel trarre conclusioni dall'applicazione della formula (1). POCHET, quindi, estese le sue riflessioni ad una sala montata ed argomentò che la resistenza d'attrito che nasce sulla fascia di rotolamento della ruota gemella si opposta allo svio, il che lo indusse ad aggiungere un termine positivo a secondo membro della (1)<sup>(2)</sup>. Ciò è errato in quanto la ruota opposta si oppone ai movimenti sia di svio che di rientro della ruota di guida. Conseguentemente se il movimento, per la sicurezza, deve essere quello del rientro allora il termine aggiuntivo deve essere negativo, come dimostrò più tardi MARIÉ.

4.2. La formula di POCHET offre per prima una valida possibilità di farsi un'idea su un fenomeno che, evidentemente, già a quell'epoca preoccupava le ferrovie. Restano tuttavia i suoi limiti e cioè la schematizzazione piana, il

<sup>(1)</sup> E' da notare che vari autori come MARIÉ, BAJOCCHI, STAGNI, CORBELLINI e CORINI non nominano NADAL, ma facciano solo riferimento a POCHET.

<sup>(2)</sup> Per questa notizia cfr. BAJOCCHI. Sempre al BAJOCCHI si deve la notizia di quello che va considerato il primo lavoro sullo svio, dovuto a T. OLIVIER e risalente al 1846; non si hanno notizie sul contenuto.

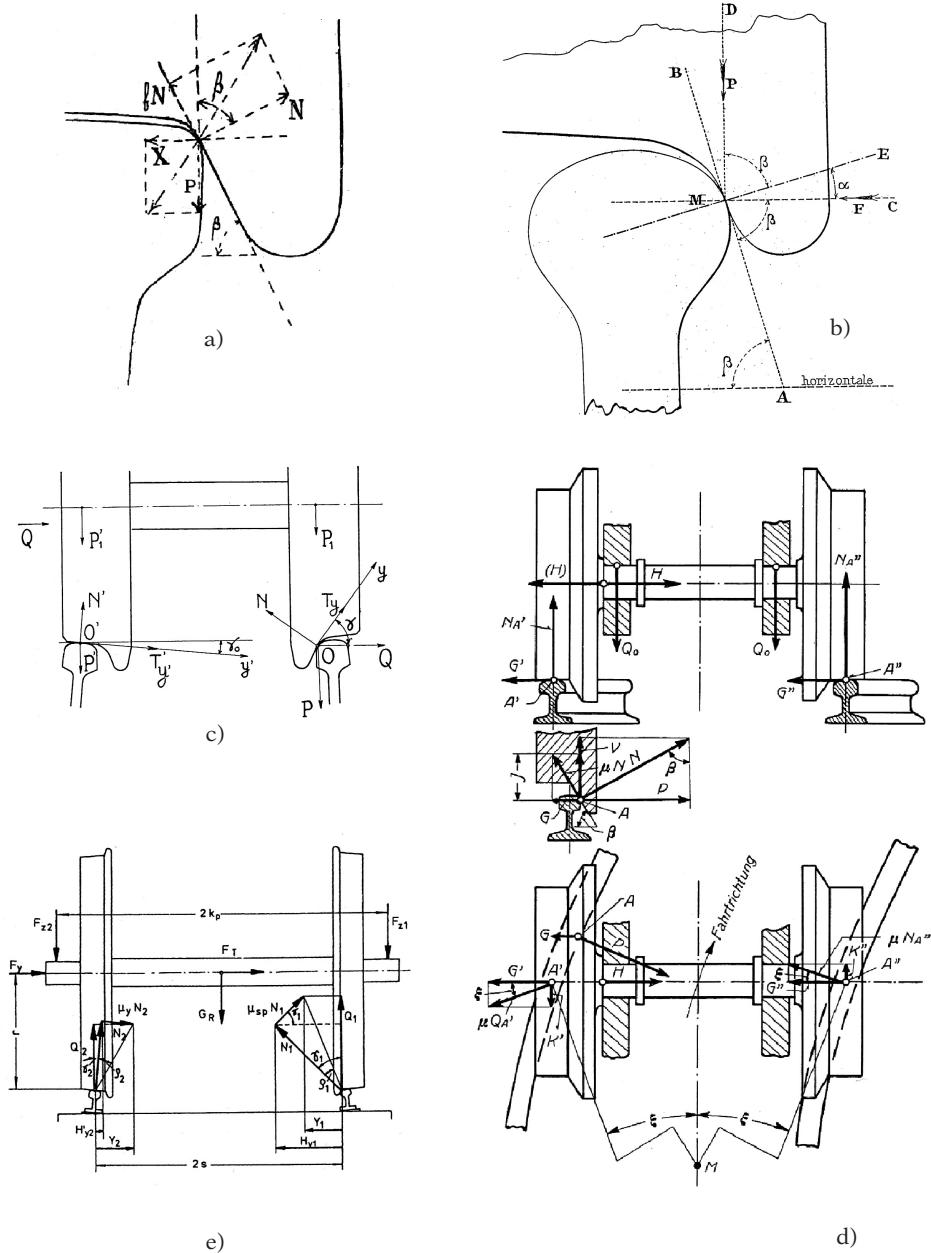


Fig. 1 – Schemi delle forze al contatto bordino-rotaia adottati da diversi autori: a) NADAL [3]; b) MARIÈ [4]; c) CHARTET [15]; d) SACHS [18]; e) MAHR [40].

## SCIENZA E TECNICA

contatto puntiforme, la mancanza di un collegamento col sistema di forze di contatto dell'intero veicolo e la mancanza di ogni conforto sperimentale che illuminasse gli aspetti quantitativi del problema.

### 5. NADAL

5.1. Una quindicina d'anni più tardi NADAL affrontava lo stesso problema in un quadro più ampio di quello di POCHET, ciò che gli consentiva di collegare il limite di svio con un sistema di forze d'interazione noto e riguardante un rotabile completo.

L'opera di NADAL [3] è volta allo studio generale della locomotiva a vapore e in questo ambito dedica allo svio un paio di paginette di piccolo formato. NADAL affronta dapprima il problema della spinta di bordino per le locomotive a vapore e la calcola imponendo una condizione limite di iscrizione vincolata bilaterale interna-esterna; in altri termini ricerca la forza di spinta del bordino della ruota di guida per una locomotiva a quattro assi per i quali la prima ruota esterna spinge sul bordino e lo stesso accade per l'ultima interna. Si tratta di un caso limite di iscrizione in curva che oggi nessuno adotterebbe come ipotesi generale, ma che presumibilmente era accettabile per NADAL forse per effetto di evidenze derivanti dall'osservazione della circolazione in curva delle macchine a vapore. Sulla base della cinematica del moto della locomotiva era possibile determinare la direzione di tutte le forze di attrito (note in grandezza poiché prodotte dal peso) e delle spinte di bordino, i cui moduli erano le due uniche incognite del problema.

Trovata l'espressione delle spinte NADAL si chiedeva se poteva verificarsi il sormonto della rotaia da parte della ruota di guida.

NADAL, in base a semplici e condivisibili considerazioni, ipotizzava che la spinta di bordino fosse spostata in avanti rispetto al piano meridiano verticale della ruota e producessesse una reazione di attrito praticamente verticale. Tuttavia affinché si verificasse lo svio la spinta di bordino doveva essere talmente elevata da far sì che il punto di contatto divenisse il centro istantaneo di rotazione, ciò che voleva anche dire assenza di reazione di attrito da parte della spinta. Analiticamente la condizione limite, secondo NADAL, andava calcolata secondo lo schema di fig. 1, identico a quello di POCHET, ma in presenza di forze di attrito. In tal modo la verifica veniva fatta appena prima che iniziasse lo svio, e lo sviluppo analitico - non presentato da NADAL - portava alla formula (1). Confrontando la spinta limite con quella calcolata in base allo schema prima indicato NADAL trovava che i valori di  $Y/Q$  erano prossimi all'unità, ciò che rappresentava un fatto tutt'altro che tranquillizzante.

NADAL però se la cavò osservando che nel moto verticale di sormonto la sospensione primaria dovesse contrarsi e produrre un aumento del carico verticale, che

avrebbe agito in modo da opporsi allo svio. Dopo di che NADAL abbandonò l'argomento dello svio per occuparsi della utilità di bissel, di sospensioni a bilanciere e di carrelli anteriori. Nei suoi esempi NADAL attribuiva al coefficiente d'attrito un valore  $f = 0,25$ .

5.2. Quale fu il merito di NADAL? Escludendo la formula (1), che si è visto non essere la sua, nonostante tutt'oggi glie ne venga attribuita la paternità, il vero merito di NADAL è l'aver messo in relazione il sistema di forze d'interazione ruota-rotaia con il limite di svio. Per il calcolo di questo sistema di forze lo schema di iscrizione in curva adottato da NADAL poteva in qualche modo essere accettabile per le locomotive a vapore a più assi accoppiati, ma oggi non trova più riscontro nei moderni veicoli a carrelli.

NADAL concludeva la trattazione giudicando il fenomeno dello svio come poco probabile e presumibilmente non meritevole di ulteriori approfondimenti. E' da porre in evidenza come questo atteggiamento mentale trovasse ancora una conferma, circa cento anni dopo, da parte di ALIAS [31] il quale affermava che, sulla base delle esperienze S.N.C.F. effettuate col carro deragliatore, prima che intervenisse lo svio si produceva lo slineamento del binario. Questa affermazione è difficile da condividersi oggi perché riguardava esperienze condotte su binari armati con rotaie da 49 kg/m e traverse di legno<sup>(3)</sup>.

Infine un elemento, che sfuggiva a NADAL ed a molti altri che hanno studiato il fenomeno svio dopo di lui, è rappresentato dal fatto che nel transitorio, sia di sormonto della rotaia sia di rientro verso la posizione normale, l'atto di moto è completamente diverso da quello per il quale vengono calcolate le forze quasi statiche di interazione ruota-rotaia; poiché queste cambiano quanto meno di direzione, il valore di  $Y$  da porre a raffronto con quello del rapporto limite di  $Y/Q$  è completamente diverso da quello che NADAL suggeriva di usare. Questo problema sarà ripreso da CHARTET.

### 6. MARIÈ

6.1. MARIÈ pubblicò una serie di articoli sulla stabilità di marcia delle locomotive nell'arco di tempo che va dal 1905 al 1911, ciò che lo colloca quasi in contemporanea a NADAL. I lavori in questione confluiranno poi nel trattato sulla stabilità del materiale ferroviario apparso nel 1924, [4], [6].

L'approccio originale a queste problematiche sta nel

<sup>(3)</sup> Testualmente NADAL affermava che "... le déraillement du fait de la poussée radiale n'est pas à craindre; il réside surtout dans les déformations de la voie qu'elle peut provoquer". C'è da chiedersi se Nadal si rendesse conto che con questa affermazione toglieva ogni valore alla formula (1) e che il confronto andava fatto con la forza limite dello slineamento, forza allora non calcolabile né misurabile.

## SCIENZA E TECNICA

fatto che egli sostenne e sviluppò – compatibilmente coi mezzi dell'epoca – l'idea che per lo studio del comportamento dinamico dovessero prendersi in conto contemporaneamente la via, coi suoi difetti, ed il veicolo.

Mentre POCHE e NADAL si occuparono dello svio con un certo distacco, il primo gli dedicò poco più di una pagina ed il secondo ne affievolì l'importanza, MARIÉ ebbe notevole sensibilità per i riflessi applicativi di una teoria sullo svio ed a conferma di ciò si sottolineano alcuni degli spunti più significativi dei suoi studi:

- a) effetti dell'angolo d'attacco della ruota di guida rispetto alla rotaia;
- b) carattere aleatorio dei fenomeni in gioco;
- c) forma ottimale dei bordini;
- d) variabilità del coefficiente d'attrito ruota-rotaia;
- e) durata di uno svio;
- f) possibilità di scarico di una ruota per effetto dei difetti verticali della via.

Sull'aspetto fondamentale dello svio MARIÉ fece innanzitutto chiarezza sul fatto che la condizione limite dovesse rispecchiare quanto accadeva ad una ruota già sollevata affinché potesse assumere di nuovo la condizione non perturbata, e ciò anche se POCHE e NADAL avevano più o meno implicitamente fatto riferimento a questa condizione. Inoltre MARIÉ fece ordine anche sulla modalità con cui tener conto della reazione di scorrimento sulla ruota opposta a quella di guida, ciò che lo portò a definire come "sua" [6] la formula seguente:

$$\frac{Y}{Q} \leq \frac{\operatorname{tg}\beta - f}{1 + f \cdot \operatorname{tg}\beta} - \frac{Q_{\text{int}}}{Q} f' \quad (2)$$

dove:

Q: carico verticale sulla ruota esterna, di guida;

$Q_{\text{int}}$ : carico verticale sulla ruota interna;

f': coefficiente d'attrito trasversale ruota-rotaia sulla ruota interna.

Nella (2) il secondo termine a secondo membro abbassa il limite definito dalla (1) ed esprime il fatto che la ruota interna con la sua reazione d'attrito trasversale  $f' \cdot Q_{\text{int}}$  si oppone al riassetto della sala montata. In ogni caso non va dimenticato che una limitazione della (2) sta nel fatto che deriva da condizioni riguardanti la sala isolata dal resto del veicolo, il che non è corretto.

Sempre in relazione alla (2) va notato che il rapporto

$$\frac{Q_{\text{int}}}{Q} < 1$$

per cui se  $f'$  è piccolo tutto il secondo termine a secondo membro diventa trascurabile. In realtà anche le più moderne ricerche sperimentali mettono in evidenza che f'

può arrivare a valori come 0,4÷0,8 e MARIÉ notò questo aspetto, sulla base di ricerche sull'attrito risalenti alla fine dell'800 e valutò che f' non dovesse superare il valore 0,5; in ogni caso il termine in questione va prudenzialmente tenuto in considerazione.

Tali spunti mettono in risalto come il MARIÉ avesse maturato un'ampia visione delle problematiche della interazione ruota-rotaia, ma va anche registrato il fatto che a lui come agli altri di quell'epoca mancavano sia gli strumenti analitici per studiare quei fenomeni sia le evidenze sperimentali illuminanti. MARIÉ percepì questa mancanza come appare chiaro dal suo trattato [6] del 1924 in cui cerca di modellare con schematizzazioni, che oggi non divideremmo, la difettosità della via ed il comportamento dinamico delle sospensioni.

Per la prima ipotizzò rotaie rettilinee ma poste a livelli diversi l'una dall'altra, ciò che veniva allora suggerito dall'accentuato dislivello nei giunti, rispetto al quale l'importanza di difetti ondulatori scompariva.

Per il secondo l'unico strumento utilizzato da MARIÉ era l'oscillatore semplice di cui cercò di studiare la risposta al tipo di difetti considerato.

Era troppo presto per affrontare problemi per i quali mancavano gli strumenti di soluzione.

Infine a testimonianza di un insoddisfatto anelito verso la ricerca di risultati sperimentali [6], MARIÉ conclude il suo trattato con una rassegna qualitativa dei tentativi di sperimentazione della interazione ruota-rotaia e del comportamento dinamico dei veicoli.

Un carattere comune ai detti tentativi è nella misura indiretta delle grandezze sulle quali si intendeva indagare.

Per le interazioni ruota-rotaia vanno ricordate le misure sull'armamento le cui deformazioni potevano quanto meno far risaltare le differenze di comportamento di veicoli di vario tipo; mentre per il comportamento dinamico dei veicoli vennero escogitati tra la fine dell'800 e l'inizio del '900 vari oscillatori sismici, che confluirono concettualmente nell'apparecchio HALLADE, che per quei tempi era quanto di più avanzato si potesse avere<sup>(4)</sup>.

6.2. Un ultimo aspetto dell'encyclopedica attività del MARIÉ, sul quale soffermare l'attenzione, è quello della durata di uno svio [4], di cui egli intuì l'importanza ma che non poté approfondire per le più volte richiamate limitazioni degli strumenti teorici e sperimentali disponibili.

Nella memoria [4] MARIÉ impostò il calcolo della durata dello svio fissando la spinta Y necessaria a provocarlo ed introdusse come unico effetto di inerzia quello derivante dalla massa della ruota.

<sup>(4)</sup> Va ricordato che nelle ferrovie italiane l'apparecchio HALLADE ebbe diffusione come strumento compartmentale nell'immediato anteguerra e venne descritto dall'ing. LIDONNICO sulla Rivista Tecnica delle Ferrovie Italiane nel numero di aprile 1938.

## SCIENZA E TECNICA

Lo schema non ha molto a che vedere con la realtà e lo stesso MARIÉ osservò, alla fine di una breve trattazione, che sarebbe stato facile tener conto anche della reazione della ruota gemella ma si astenne dal farlo.

Nel suo trattato [6] MARIÉ si limita a ricordare questo fenomeno senza però presentare alcuna trattazione analitica, segno evidente della poca fiducia in essa riposta.

L'importanza di questo contributo del MARIÉ deriva dal fatto che circa sessant'anni più tardi americani [49] e giapponesi [37], operando con ben altri mezzi, utilizzarono la durata del fenomeno di svio per elaborare nuovi criteri di stabilità.

### 7. CHARTET

7.1. CHARTET era un funzionario della sezione Prove e Ricerche del servizio Materiale e Trazione della S.N.C.F. e, pertanto, lo stimolo alla speculazione scientifica rappresentava un fattore connaturato alle sue attività istituzionali. Questo autore, come risulta anche da segnalazioni bibliografiche nei suoi articoli, aveva una preparazione fortemente radicata negli studi di meccanica razionale che egli sfruttò con grande abilità nella sua ricerca sulla teoria dello svio.

Pubblicò sul tema un corposo lavoro, apparso in due articoli sulla *Revue Générale des Chemins de Fer*, distanziati fra loro di due anni [15]. La ricerca fu presentata con grande rilievo da quella Rivista e rappresentava il frutto di lunghi studi svolti negli anni '40 e che – per dichiarazione dell'autore – ricoprivano diverse centinaia di cartelle datiloscritte.

CHARTET in buona sostanza chiude l'epoca della scuola francese iniziata con POCHET, consentendo alla stessa di compiere un balzo in avanti soprattutto per la modernità degli strumenti utilizzati. Tuttavia, a differenza di NADAL citato all'inizio di tutte le bibliografie, CHARTET non ha goduto di un'analogia popolarità scientifica e sulla ragione di ciò si possono avanzare solo delle ipotesi.

Una, abbastanza ragionevole, riguarda la lingua in quanto il francese ha scarsa capacità di penetrazione nel mondo anglosassone; un'altra riguarda la collocazione temporale del lavoro forse troppo avanzato per quell'epoca di dopoguerra; infine non va dimenticato che ancora mancavano visioni interpretative della stabilità di marcia di un veicolo, nelle quali la teoria di CHARTET avrebbe potuto trovare naturale collocazione.

7.2. In fig. 1, lo schema di CHARTET delle forze agenti sulla sala montata è quello contrassegnato dalla lettera c). Si noti la ricomparsa della reazione ortogonale al contatto N, già presente in NADAL ma non evidenziata da MARIÉ. Si noti tuttavia che, mentre NADAL evidenziava le componenti prodotte dall'attrito, CHARTET le lascia implicite.

I più complessi legami vettoriali delle forze agenti sulla sala, in condizioni di attrito, appaiono con completezza

negli schemi d) ed e), che appartengono alla scuola tedesca della Spurführung.

E' da mettere in risalto che, prima di entrare sul merito della sua interpretazione del fenomeno dello svio, CHARTET tenne a chiarire una fondamentale distinzione fra problema statico e problema dinamico; distinzione questa che era sfuggita ai suoi predecessori e che era costata loro qualche piccola incongruenza.

Il problema statico deve intendersi come attinente ad una situazione di forze in equilibrio, in assenza di forze d'inerzia, nel quadro della stabilità dei parametri che lo governano. In altri termini la soluzione del problema statico deve essere in grado di configurare un dominio nell'ambito del quale è assicurata la costanza dell'accoppiamento ruota-rotaia. Al contrario uno svio in condizioni dinamiche è un fenomeno di breve durata, nel quale non solo intervengono forze d'inerzia non trascurabili, ma anche taluni parametri subiscono una evoluzione molto rapida. In definitiva il problema dinamico si configura in maniera molto diversa da quello statico. Anche nel caso del problema dinamico lo scopo diviene quello di costruire un dominio di forze e parametri all'interno del quale ricadono tutti i fenomeni di innalzamento della ruota fin quando l'innalzamento è inferiore all'altezza del bordino; al di là di questo limite il fenomeno è completamente diverso.

A questo punto è da richiamare l'attenzione sul fatto che la formulazione dinamica, indipendentemente dagli sviluppi analitici che CHARTET si proponeva di produrre, rappresenta ancor oggi la chiave per l'interpretazione delle ricerche sperimentali sullo svio. In questa ottica le ricerche, nelle quali i sistemi di misura e le procedure di analisi dei risultati non fossero in grado di far luce sulla fenomenologia dinamica prima descritta, avrebbero poco significato.

CHARTET però non presentò mai la sua soluzione del problema dinamico.

7.3. CHARTET imposta la sua soluzione del problema statico scrivendo le equazioni d'equilibrio delle due ruote di fig. 1c.

$$N' = P' \quad (3)$$

$$N = \frac{P - T_y \sin \gamma}{\cos \gamma} \quad (4)$$

$$Q_\delta = \frac{P \sin \gamma - T_y}{\cos \gamma} - (N' \gamma_0 + T_{y'}) \quad (5)$$

Per comodità di lettura va ricordato che i simboli usati da CHARTET sono diversi da quelli oggi impiegati pertanto valgono le seguenti equivalenze.

$\gamma = \gamma_m = \beta$  angolo del bordino rispetto all'orizzontale.

$$N' = Q_{int} \quad \text{oppure } Q_{12}$$

## SCIENZA E TECNICA

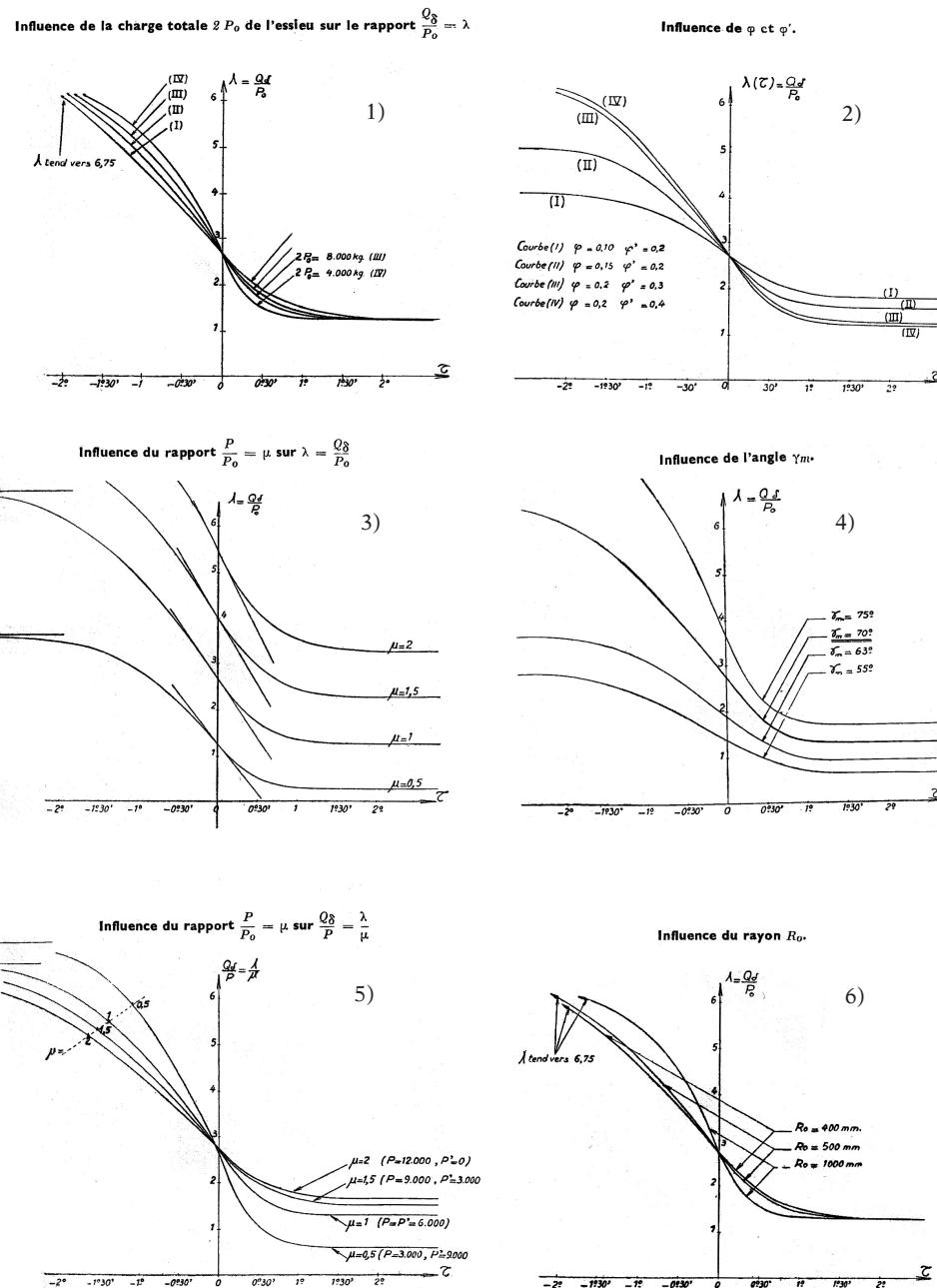


Fig. 2 – I diagrammi di CHARTET [15].

## SCIENZA E TECNICA

$$N = Q \quad \text{oppure } Q_{11}$$

$$Q_\delta = Y_{11} \quad \text{oppure } Y$$

$$\varphi = f \quad \text{oppure } \varphi' = f' \text{ coeff. di attrito}$$

Per le componenti tangenziali viene introdotto il legame di scorrimento, peraltro già noto perché utilizzato in campo ferroviario da CARTER fin dal 1916 e da Levi nel 1935 [12]. Pertanto le forze tangenziali  $T_y$  e  $T'_y$  possono scriversi nella forma

$$T_y = N\varphi v_y \quad (6)$$

$$T'_y = N'\varphi'v'_y \quad (7)$$

ciò che consente di riscrivere le (4) e (5) nella forma:

$$N = \frac{P}{\cos \gamma + \varphi v_y \sin \gamma} \quad (8)$$

$$Q_\delta = P \frac{\operatorname{tg} \gamma - \varphi v_y}{1 + \varphi v_y \operatorname{tg} \gamma} - (\gamma_0 + \varphi' v'_y) P' \quad (9)$$

Il problema ora è quello di esplicitare i termini  $v_y$ ,  $v'_y$  tenendo conto non solo di quanto accade nell'area di contatto Hertziano fra bordino e rotaia ma anche in funzione dell'angolo  $\tau$  della ruota rispetto alla rotaia. La formula finale alla quale perviene CHARTET dopo circa cinquanta passaggi è la seguente:

$$\frac{Q}{P_0} = \mu(\operatorname{tg} \gamma + \gamma_0) - 2\gamma_0 \frac{J\tau}{\sqrt{\tau^2 + \left(\frac{J}{P_\lambda}\right)^2}} \quad (10)$$

dove:

$$J = \varphi\mu \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}{1 + \varepsilon\varphi \operatorname{tg} \gamma} + (2 - \mu)\varphi' \quad (11)$$

e

$$P_\lambda = CR_0^2 \sqrt{\frac{\mu}{P_0} \left( \frac{\varphi}{\sin \gamma (\cos \gamma)^{3/2}} + \varphi' \right)} \quad (12)$$

$\varepsilon = +1$  per  $\tau \approx 0$

$R_0$  = raggio di rotolamento

$\varepsilon = -1$  per  $\tau \leq 0$

$$\mu = \frac{P}{P_0} = \frac{2P}{P + P'}$$

$2P_0$  = carico per asse

$C \approx 56$

per  $P$  in daN,  $R_0$  in mm e  $\tau$  in radianti.

Con il procedimento risolutivo che ha portato alla (10) CHARTET, salvo alcune modeste approssimazioni, anticipava il lavoro che dopo circa venticinque anni porterà alla trattazione di JOHNSON, KALKER [32] ed altri.

Lungi dal limitarsi alla soluzione del problema rappresentato dalle (10), (11) e (12), CHARTET ne fece uno studio parametrico di cui in fig. 2 si riproducono i 6 diagrammi più significativi, di seguito illustrati brevemente. Tutti i diagrammi presentano in ascissa il parametro  $\tau$ , variabile in un campo di  $\pm 2^\circ$  all'incirca.

Il diagramma 1 descrive l'andamento del rapporto  $\lambda$ , che con la simbologia attuale corrisponde ad  $Y/Q_0$ , dove  $Q_0$  è il carico nominale per ruota, in funzione di  $\tau$  ed in funzione parametrica del carico nominale per asse  $2P_0$ . L'influenza di questo parametro è decisamente modesta. La funzione di  $\lambda$  presenta in tutti i diagrammi di fig. 2 asintoti orizzontali per  $\tau$  crescente positivamente oltre l'intervallo già indicato.

Identico andamento qualitativo, con un diverso effetto del parametro considerato, si nota nei diagrammi 2, 5 e 6. In relazione al diagramma 2 c'è da osservare una sua scarsa esaurività in quanto i valori dei coefficienti d'attrito  $\varphi$  e  $\varphi'$  non variano in un campo adeguatamente ampio.

Il diagramma 5 illustra l'effetto del carico agente sulla ruota di guida sul parametro  $Q/P$ , ovvero  $Y/Q$ , per un carico per asse di 12 t, costante; in altri termini lo squilibrio di carico fra le due ruote. L'effetto più vistoso riguarda l'asintoto orizzontale che si sposta verso l'alto all'aumentare del sovraccarico sulla ruota esterna.

Il diagramma 6, infine, riguarda l'effetto della variazione parametrica del raggio della ruota  $R_0$ , che appare sostanzialmente trascurabile.

Il diagramma 3 dovrebbe legarsi al diagramma 5, ma non aggiunge molto, anzi non si comprende l'utilità di un'analisi parametrica di  $\mu$  nella quale la spinta di bordino  $Q_\delta$ , ovvero  $Y$ , viene riferita al carico nominale  $P_0$ , avendo già il diagramma 5.

Molto più interessante è il diagramma 4 che illustra l'effetto su  $\lambda$  della inclinazione del fianco del bordino  $\gamma$ , parametro quest'ultimo che in genere aumenta gradualmente durante l'esercizio passando dal suo valore nominale a valori crescenti.

Va ricordato inoltre che, ad eccezione del diagramma 4, tutti gli altri presuppongono l'angolo  $\gamma = 70^\circ$  in uso nelle ferrovie francesi.

Per concludere questa panoramica resta da constatare effetti analoghi, e più confortanti, per quanto riguarda la stabilità rispetto allo svio, quando  $\tau$  assume valori negativi; questo fenomeno si verifica sulla ruota interna nella inscrizione forzata delle locomotive a passo lungo ed assi multipli.

E' da notare la presenza di asintoti inferiori ad 1 per il rapporto  $\lambda$  soprattutto per la variabilità di  $\mu$  e  $\gamma$ . A questo proposito è necessario richiamare l'attenzione sul fatto che CHARTET, considerando un asse isolato, riferisce la

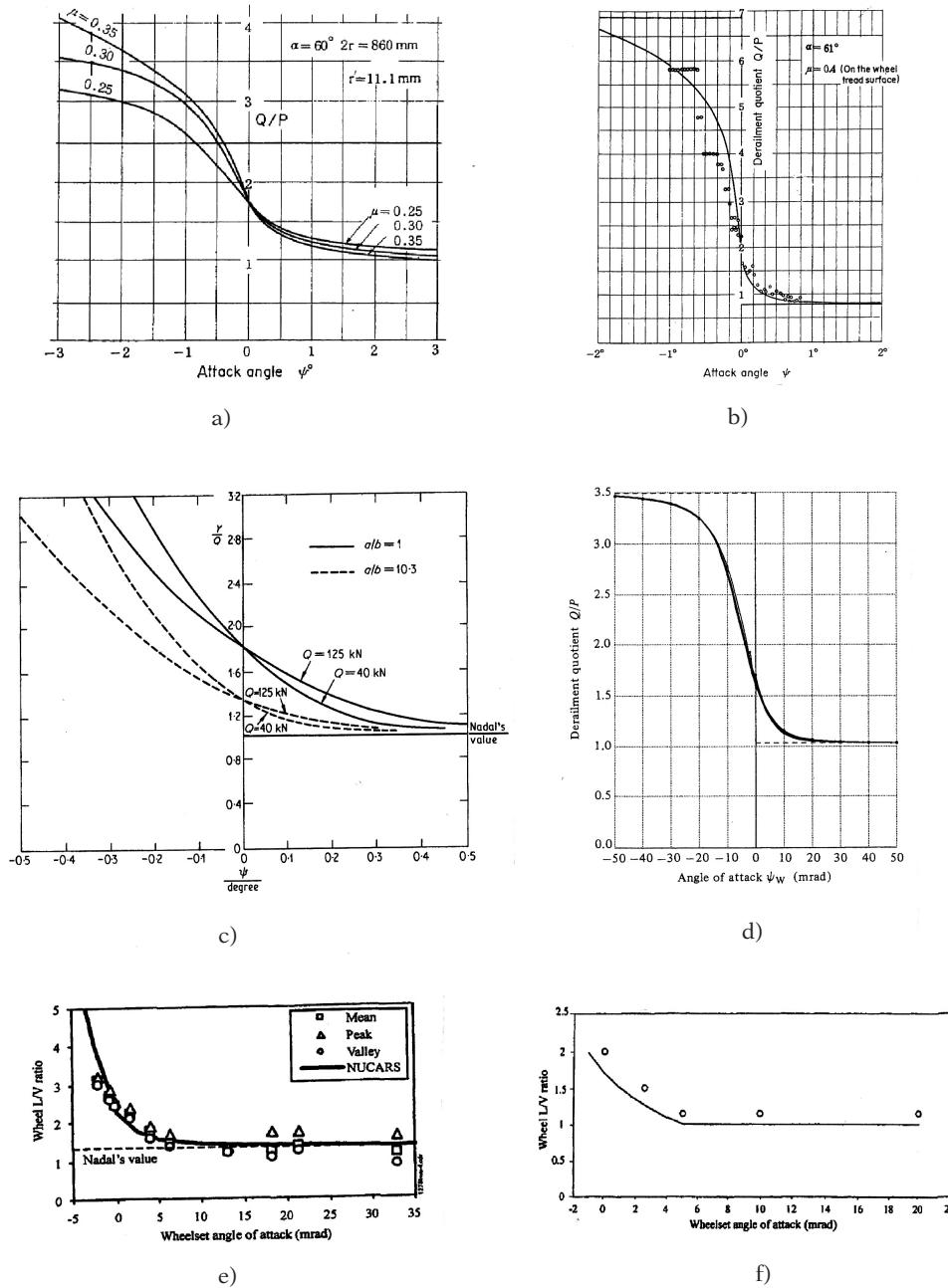


Fig. 3 – I diagrammi di CHARTET [15].

spinta di bordino  $Q_\delta$ , ovvero  $Y$ , al carico nominale per ruota  $P_\delta$ . Solo nel diagramma 5 riferisce la spinta di bordino  $Q_\delta$  al carico effettivo sulla ruota  $P$ , per cui è soltanto il parametro di CHARTET  $\lambda/\mu$  che corrisponde al parametro di sicurezza, oggi di uso corrente,  $Y/Q$  ovvero

$$\frac{\lambda}{\mu} = \frac{Y}{Q} \quad (13)$$

7.4. A questo proposito la disponibilità degli strumenti analitici prodotti da CHARTET ed i diagrammi parametrici illustrati al punto precedente dovrebbero mettere la parola fine al problema del calcolo del dominio statico di stabilità rispetto allo svio.

Tuttavia i notevoli progressi riguardanti i fenomeni di contatto ruota rotaia e le possibilità offerte dal calcolo automatico e dalla sperimentazione inducono a chiedersi se i risultati di CHARTET sono sempre validi o se oggi si può ottenere qualcosa di diverso.

### 8. Alcuni semplici confronti

8.1. La risposta ovvia, ma onerosa, al quesito appena formulato dovrebbe essere quella di utilizzare i migliori programmi di interazione ruota-rotaia capaci di simulare lo svio e sottoporre i risultati a verifica sperimentale. Questa è l'attività cui si dedicano, con una certa fatica, i gruppi di ricerca contemporanei.

Tuttavia la letteratura tecnica viene in soccorso di fronte a questo problema con qualche elemento di sintesi risolutivo.

8.2. In fig. 3 sono rappresentati alcuni diagrammi nei quali le ordinate rappresentano il rapporto di svio  $Y/Q$ ,  $Q/P$ ,  $L/V$ , cioè le stesse grandezze a seconda dei simboli usati dagli autori, in funzione dell'angolo di attacco  $\psi$  della ruota rispetto alla rotaia. Tutti questi diagrammi sono confrontabili con quelli di fig. 2, prodotti da CHARTET.

Si confronti ad esempio i diagrammi 1, 2 e 4 di CHARTET con il diagramma a) di fig. 3, di YOKOSE del 1966, ricordando che, dove non diversamente specificato, i diagrammi di CHARTET prevedono un angolo di bordino di  $70^\circ$ .

In particolare si nota in fig. 2, diagramma 4 e fig. 3 diagramma a) e b) che l'asintoto orizzontale, a parità di angolo del bordino, ha ordinata praticamente unitaria mentre l'intersezione con l'asse delle ordinate avviene con una ordinata  $1,5+2$ . Si noti la medesima corrispondenza in un diagramma sperimentale su modello riprodotto in fig. 3 b) [23].

Idem per un altro autore MATSUI [29] del 1986 col diagramma di fig. 3d); ed ancora per il diagramma di GILCHRIST e BRICKLE [30] di fig. 3c), del 1976.

Sulla stessa tendenza sono i diagrammi di fig. 3e) 3f) di origine americana ELKINS e WU [40], anche questi basati su più recenti indagini teoriche e sperimentali.

Per il confronto dei vari diagrammi è opportuno rac-

comandare di non perdere di vista la differenza di scala delle ascisse.

A quanto già fatto osservare si aggiunge che in numerose altre pubblicazioni sono riprodotti diagrammi simili che conducono alle medesime constatazioni e che qui non vengono riprodotti per scrupolo di brevità.

E' da notare infine che per angoli d'attacco negativi tutti i ricercatori concordano nell'evidenziare rapporti di svio talmente elevati che non presentano alcuna significatività pratica ai fini della sicurezza dallo svio.

8.3. Constatato quanto precede, si può concludere che per quanto concerne la soluzione del problema statico dello svio la rappresentazione che ne ha dato CHARTET è praticamente esaustiva per quanto concerne gli effetti prodotti dalla variabilità dei parametri in gioco.

Su questo stesso tema va ricordata un'affermazione di KALKER [32] in una sua pubblicazione del 1978, nella quale metteva in evidenza che i risultati, cui perveniva la sua indagine teorica e quelli ottenuti sperimentalmente da JOHNSON, coincidevano e che le differenze osservate da altri sperimentatori dipendevano dallo "insudiciamento" superficiale di ruote e rotaie; di questo fenomeno tuttavia era possibile tener conto anche per via teorica introducendo un supplemento di rigidità superficiale caratteristico del materiale interposto fra ruota e rotaia.

Sfortunatamente, osservava ancora KALKER, questi parametri variano da luogo a luogo e da un giorno all'altro; pertanto per calcoli pratici sarebbe stato necessario assumere un valor medio dei parametri in argomento e soprattutto di assicurarsi che il rotabile non risentisse della loro variabilità.

Come ci si possa assicurare a priori di questo fatto non è semplice e presuppone quanto meno un'ampia indagine parametrica di verifica.

Le considerazioni di KALKER conservano la loro piena validità, anche a più di trent'anni di distanza, e ciò dovrebbe suggerire cautela nella valutazione dei risultati prodotti dai modelli di calcolo più in voga e soprattutto sulla loro attitudine a sostituirsi alla sperimentazione.

Tuttavia qualcosa si conosce e questo qualcosa deve bastare all'ingegneria di questi anni per tentare di risolvere i suoi problemi.

Cosa fare allora? Un tentativo di risposta a questo quesito costituirà l'oggetto delle conclusioni, cui perverrà questa ricerca storico-scientifica; tuttavia già a questo punto possono delinearsi alcuni concreti indirizzi di studio che presuppongono l'impiego di mezzi e procedure già disponibili ed in funzione.

### 9. Ipotesi di lavoro

9.1. Se si considerano le due formule sui limiti di svio, quella cosiddetta di NADAL e quella statica di CHARTET, si nota che non ci sono molti elementi sui quali il progetti-

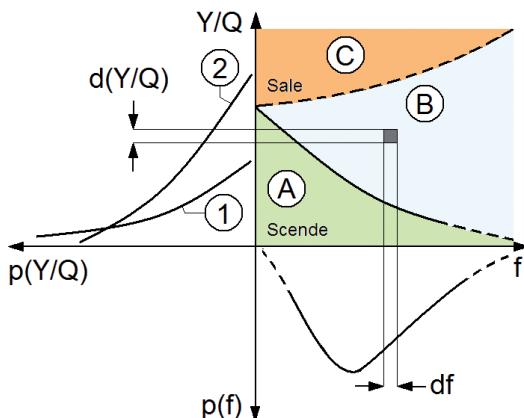


Fig. 4 – Le tre regioni del piano ( $Y/Q, f$ ). Nella zona A, ogni combinazione di valori di ascissa e ordinata non è in grado di turbare la stabilità allo svio dell'accoppiamento ruota-rotaia. Nella zona B, i vari punti rappresentano situazioni in cui non è rispettata la condizione di stabilità ma che tuttavia non evolvono spontaneamente verso la stabilità o lo svio. Nella zona C ogni combinazione conduce allo svio in condizioni dinamiche. I termini "Sale" e "Scende" si riferiscono al movimento della ruota rispetto alla rotaia in caso di ipotetico sollevamento della prima.

sta di una ruota o di un carrello possa intervenire per limitare se non annullare i rischi di svio.

Dal punto di vista meramente costruttivo va infatti analizzata la variabilità di progetto e/o per usura dell'angolo di inclinazione del bordino e la possibilità di contenere l'angolo d'attacco della ruota di guida, conferendo alla sala montata elasticità rispetto al telaio del carrello.

Sono tipici al riguardo gli studi di Boocock per l'A.P.T. e quelli di SCHEFFEL per i carrelli ad assi orientabili.

Va aggiunto a questi due provvedimenti il contenimento dell'attrito bordino-rotaia per mezzo degli ungibordo ed il controllo dell'attrito sulla fascia di rotolamento mediante sostanze appositamente studiate.

Tutti questi provvedimenti sono già usati, in misura variabile a seconda del contesto operativo, per cui non costituiscono oggetto di novità. Uno dei più recenti lavori sul tema [50] propone in conclusione raccomandazioni di buon senso.

A fronte delle soluzioni di progetto ci sono quelle di protezione ed intervento; queste però – come già messo in evidenza all'inizio – agiscono quando lo svio si è prodotto e tendono al più a limitarne le conseguenze [54].

Resta quindi valido l'interrogativo posto al termine del punto 8.3. e cioè cosa fare?

9.2. Un tentativo di risposta può essere formulato, partendo dalla divisione fondamentale che CHARRET ha introdotto nel problema dello svio, separando il problema statico da quello dinamico e, come corollario di questa, dal

considerare accanto al valore di  $Y/Q$  anche la sua durata, come già anticipato da MARIÉ e sviluppato nei giorni nostri dai ricercatori giapponesi ed americani.

In via preliminare è opportuno far un po' d'ordine sul modo col quale i parametri in questione influiscono sulle problematiche del comportamento statico e dinamico.

Si parte dall'ipotesi di conoscere una legge sufficientemente valida che esprima il limite di stabilità allo svio, ad esempio la (1), la (2), la (9) o la (10) e di rappresentarla in un piano avente in ordinata il rapporto  $Y/Q$  ed in ascissa il valore del coefficiente d'attrito, inteso come limite asintotico cui tendono le curve forza-scorrimento.

A questa curva va evidentemente associata una ennupla di parametri che consenta una relazione con le curve di CHARRET riprodotte in fig. 2. Ne consegue che in effetti si deve pensare ad una famiglia di curve possibili in conseguenza della variabilità combinata degli elementi costitutivi dell'ennupla. Non è tuttavia necessario complicare le cose con la famiglia esaminando le curve singolarmente e basterà ai fini metodologici di questo lavoro di considerarne una. Sia essa quella rappresentata a tratto continuo in fig. 4.

Esiste inoltre un'altra curva derivante da uno studio statico del sormonto della rotaia da parte del bordino. Non si è mai ritenuto di farne menzione per le incertezze che la caratterizzano, tuttavia è interessante tenerne conto almeno da un punto di vista puramente qualitativo. La curva in questione deriva dall'inversione delle forze d'attrito di fig. 1. Questa curva è rappresentata a tratteggio in fig. 4.

Le due curve dividono il piano  $Y/Q, f$  in tre regioni. La regione sottostante la curva continua, contrassegnata dalla lettera A, è quella della stabilità; in ogni punto di essa le coppie di valori  $Y/Q$  ed  $f$  non sono in grado di produrre lo svio.

Nella zona C, sovrastante la linea a tratteggio lo svio è certo ed avviene in condizioni dinamiche; per questa ragione la curva a tratteggio, che potrebbe calcolarsi con il metodo di quella statica, non ha significato quantitativo bensì vuole ricordare l'esistenza di una zona di transizione tra stabilità e svio.

Nella zona B ogni punto rispecchia situazioni di forze che non soddisfano la condizione di stabilità ma al tempo stesso non sono in grado di produrre il sormonto della ruota sulla rotaia; in queste situazioni tutto dipende dall'evoluzione successiva di  $Y/Q$  ed  $f$ .

Tutto ciò posto si può ritenere che ogni considerazione su quanto rappresentato nel primo quadrante di fig. 4 deve legarsi in qualche modo all'aleatorietà che caratterizza le due grandezze in ascissa ed ordinata, rispettivamente  $f$  ed  $Y/Q$ .

Ciò può farsi rappresentando sul prolungamento degli assi delle ascisse e delle ordinate le funzioni di densità di probabilità di  $Y/Q$  e di  $f$ . Per le prime potrebbe ipotizzarsi un andamento come quello definito dalle curve 1 e 2, una

## SCIENZA E TECNICA

tipica di linee a facile tracciato, l'altra per linee tortuose, mentre per l'attrito si può pensare ad una gaussiana o a qualcosa di simile.

In tal modo ad ogni punto del primo quadrante può associarsi una probabilità

$$p\left(\frac{Y}{Q}\right) d\left(\frac{Y}{Q}\right) \cdot p(f) df$$

che diviene probabilità infinitesimale di svio solo se l'area

$$d\left(\frac{Y}{Q}\right) \cdot df$$

si trova nel campo BC, così come esemplificato in figura. L'integrazione della probabilità infinitesimale diviene simbolicamente probabilità di svio  $P_{sv}$  e di pericolato svio,

$$P_{sv} = \iint_{\alpha \beta} p\left(\frac{Y}{Q}\right) p(f) d\left(\frac{Y}{Q}\right) df \quad (13)$$

avendo indicato con  $\alpha$  e  $\beta$  i campi di esistenza delle grandezze  $Y/Q$  ed  $f$ , per i quali le areole si trovano nel dominio B o C. Se con  $N$  si indica il numero di carrelli o carri a due assi di un determinato tipo circolanti durante un assegnato tempo di riferimento  $T$ , allora il numero atteso di svii e di pericolati svii  $n_{sv}$  per questa classe di veicoli viene determinato come

$$n_{sv} = NP_{sv} \quad (14)$$

Il totale verrà da una sommatoria dei contributi delle varie classi. Questa parte analitica non viene approfondita perché su di essa si tornerà alla fine di questo lavoro di ricerca. In quella sede emergeranno alternative computazionali nonché altri sviluppi riguardanti vari aspetti dei quali vale la pena ricordare quelli relativi alla più precisa definizione della curva di separazione tra A e B, alla parametrizzazione in funzione della velocità di marcia, l'estensione che devono avere i tratti di campionamento, forme più sintetiche di valutazione, ecc.

**9.3.** Gli elementi necessari per lo sviluppo applicativo dei calcoli sopra accennati traggono origine dalla sperimentazione associata ai controlli periodici dello stato geometrico della via effettuati con i moderni treni di misura.

Di nuovo possono esserci solo altre elaborazioni ma l'hardware non dovrebbe cambiare. Infatti i treni in questione sono equipaggiati con sale montate attrezzate per la misura di  $Y$  e  $Q$ , dalle quali, per campionamento, possono facilmente dedursi sia le funzioni

$$p\left(\frac{Y}{Q}\right) p(Y) p(Q)$$

sia le funzioni

$$p(f)$$

elaborando per la prima i dati relativi alla ruota di guida, mentre per la ruota opposta il rapporto  $Y/Q$  fornisce con continuità il valore dell'attrito trasversale ruota-rotaia, che potrebbe essere attribuito anche al bordino purché in assenza di lubrificazione.

Le misure riguardanti la geometria orizzontale della via sono legate ad una piattaforma inerziale di riferimento, relativamente alla quale può anche ricavarsi la posizione del carrello e quindi l'angolo di attacco della ruota di guida con la rotaia esterna della curva. Ciò apre la via ad una serie di interpretazioni basate sulla famiglia di curve elaborate da CHARTET. Si tratta di problemi tutti risolubili per i cui approfondimenti, tuttavia, non è questa la sede.

**9.4.** Un ulteriore elemento che può ottenersi dalle misure in argomento riguarda la rilevazione sperimentale diretta delle situazioni di pericolo di svio, con livello di pericolosità evidentemente minimo.

Ciò è possibile se si pensa che le situazioni in questione sono quelle per le quali si rompe l'equilibrio statico che, evolve in una fase dinamica, potenzialmente di svio, purché la situazione di forze e geometrie che l'hanno prodotta durino per un tempo sufficiente.

A titolo esplicativo si può immaginare una normale marcia in curva, durante la quale la sala montata anteriore di un carrello riceve dalla via le due azioni  $Y_1$  sulla ruota esterna, e  $Y_2$  su quella interna. Entrambe queste forze sono dirette verso il centro della via, così come rappresentato nello schema di forze e) di fig. 1. Se dovesse prodursi uno svio la ruota di guida inizierebbe a sollevarsi ed a muoversi verso l'esterno del binario, il che comporta una inversione della forza  $Y_2$  mentre la  $Y_1$  continuerebbe a restare diretta verso il centro della via. Un fenomeno del genere può innescarsi in conseguenza di una brusca variazione di scartamento o in situazioni di anomalia elastica della via [52].

### 10. Riflessioni finali

Si è partiti dalla consultazione di testi di cento anni fa, scoprendo che quei ricercatori avevano detto molto di più di quanto non sia poi filtrato nella conoscenza diffusa odierna sul problema dello svio.

Nell'arco di tempo qui esaminato gli studi su questo tema si incentrano tuttavia su CHARTET, che – praticamente inascoltato – anticipò e risolse problemi che furono poi ripresi da altri studiosi più recenti.

Gli approfondimenti in tema di svio, ancorché parziali, innescano riflessioni che guidano nello studio integra-

## SCIENZA E TECNICA

to del sistema via-veicolo e permettono di intravedere interessanti sviluppi nella gestione razionale del degrado della via e della sicurezza della circolazione; in particolare essi consentirebbero di sviluppare una chiave di lettura innovativa dei rilievi della via e dei sistemi di misura connessi – anche a fini di prevenzione.

Gli autori sottolineano infine una profonda necessità di condivisione di quanto osservato fin qui in questa ricerca, soprattutto verso i giovani che non mancheranno di porsi il quesito formulato da MARIÉ quasi cento anni fa.

Si ritiene in particolare che gli ulteriori sviluppi di questa linea di ricerca scientifico-storica non mancheranno di produrre interessanti risultati, soprattutto per la possibilità di reinterpretare con gli occhi di oggi, orientati anche al passato ed al futuro, i contributi sparsi prodotti da tanti ricercatori su uno dei problemi fondamentali della dinamica ferroviaria.

La prossima tappa verterà sul tema della scuola tedesca della Spurführung, centrata sul lavoro fondamentale di UEBELACKER e di HEUMANN e su quelli dei loro allievi.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] POCHET, "Theorie du mouvement en courbe sur les chemins de fer", Editions Dunod, Parigi 1882.
- [2] NADAL, "Theorie de la stabilité des locomotives", Annales des Mines, 1896.
- [3] NADAL, "Locomotives à vapeur", Editions Doin, Parigi 1908.
- [4] MARIÉ, "Etude complémentaire sur la stabilité du matériel des chemins de fer. Théorie des déraillements et profil de bandages", Memoirs de la Société des Ingénieurs Civils, conferenza del maggio 1909, pubblicata nel novembre 1910.
- [5] UEBELACKER, "Untersuchungen über die Bewegung von Lokomotiven mit Drehgestellen in Bahnkrummungen", Organ für den Fortschritt des Eisenbahnwesens, Vol. 68, 1903, Beilage , pag. 1-26.
- [6] MARIÉ, "Traité de stabilité du matériel des Chemins de Fer", Editions Béranger, Parigi 1924.
- [7] GIOVENE, "La teoria degli svii", Rivista Tecnica delle Ferrovie Italiane, dicembre 1924, pag. 213-216.
- [8] GIOVENE, "Per lo studio degli svii. Oscillazioni, effetti d'inerzia e giroscopici del materiale rotabile", Rivista Tecnica delle Ferrovie Italiane, maggio 1926, pag. 224-228.
- [9] GIOVENE, "L'applicazione della teoria degli svii", Rivista Tecnica delle Ferrovie Italiane, aprile 1927, pag. 161-166.
- [10] GRISMAYER, "Ferrovie", Vol. I-II-III-IV, Edizioni della R Scuola d'Ingegneria di Roma, 1927.
- [11] JAHN, "Spurerweiterung oder nicht?", Zeitschrift des Vereins deutscher Eisenbahnverwaltungen, 1927.
- [12] LEVI, "Etude relative au contact des roues sur le rail", Revue Générale des Chemins de Fer, febbraio 1935, pag. 81-107.
- [13] LA MAGNA, "Prove di svilamento sulle ferrovie del Sud-Africa", Rivista Tecnica delle Ferrovie Italiane, maggio 1939.
- [14] BOUTELOUP, "Le contact rail-roue", Revue Générale des Chemins de Fer, ottobre 1947, pag. 340-353.
- [15] CHARTET, "La théorie statique du déraillement d'un essieu", Revue Générale des Chemins de Fer, agosto 1950, pag 365-386 e seguito sul numero di settembre 1952, pag. 442-453.
- [16] HEUMANN, "Zum Verhalten von Eisenbahnfahrzeugen in Gleisbogen", Organ für den Fortschritt des Eisenbahnwesens, Vol. 6, 1913, pag. 104-108; pag. 118-121; pag. 136-140; "Grundzüge der Spurführung", Elektrische Bahnen, articoli vari apparsi fra il 1952 ed il 1953.
- [17] BAJOCCHI, "Tecnica ed Economia dei Trasporti", Edizioni CIFI, 1953.
- [18] SACHS, "Elektrische Triebfahrzeuge", Edizioni Huber&Co, Vol. I, 1953.
- [19] KERESZTY, "La question du déraillement", Bulletin AICCF, dicembre 1952, pag. 943-970.
- [20] NOTHEN, "ABC der Spurführung", Glasers Annalen, agosto 1957, pag 264-273, settembre 1957, pag 296-314.
- [21] KRUGMANN, "Untersuchung von Entgleisung in schwierigen Fällen", Eisenbahningenieur, n.6, 1960, pag. 185-194.
- [22] BRANDANI, "Condizioni di marcia dei carri a lungo passo sugli sgombri del binario", Ingegneria Ferroviaria, ottobre 1965, pag. 859-876.
- [23] YOKOSE, "A theory of the derailment of wheelset", Quarterly Report RTRI, nr. 3, 1966, pag. 30-34.
- [24] PRUD'HOMME, "La resistance de la voie aux efforts transversaux exercés par le matériel roulant", Revue Générale des Chemins de Fer, gennaio 1967, pag. 1-23.
- [25] KUREK, "Das Zusammenspiel von Rad und Schiene im Hinblick auf Entgleisungssichereit, Verschleiss, Laufruhe und Radsatzbeanspruchung", ETR, settembre 1966, pag. 338-346.
- [26] WEBER, "Zum Problem der Querreibung zwischen Rad und Schiene beim Durchfahren von Gleisbögen", Glasers Annalen, aprile 1968, pag.107-112.
- [27] KRUGMANN, "Trag- und Fuhrungselemente im Rad-Schiene-System", Glasers Annalen, maggio 1971, pag.107-118.

## SCIENZA E TECNICA

- [28] TANAHASHI, "Derailment coefficient and climbing probability of wheel flange", Quarterly Report RTRI, n.1, 1973, pag 29-34
- [29] MATSUI, "A study on the derailment of two-axles freight car due to interaction between track and vehicle. Mechanism of the phenomenon and factors affecting the safety", Quarterly Report RTRI, nr. 4, 1973, pag. 214-223.
- [30] GILCHRIST, BRICKLE, "A Re-examination of the proneness to derailment of a railway wheel-set", Journal of Mechanical Engineering Science, 3/1976, pag.131-141.
- [31] ALIAS, "La voie ferrée", Editions Eyrolles, Parigi 1977.
- [32] KALKER, "Über die Mechanik des Kontaktes zwischen Rad und Schiene", ZEV, Glasers Annalen, luglio-agosto 1978, pag. 214-218.
- [33] SWEET, KARMEL, "Evaluation of time-duration dependent wheel load criteria for wheelclimb derailment", Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 103, settembre 1981, pag. 219-227.
- [34] KRUGMANN, SEIFART, "Entgleisung im Gleisbogen durch Übergeschwindigkeit", Archiv für Eisenbahntechnik, Heft 36, 1981, pag. 41-45.
- [35] KRUGMANN, "Lauf der Schienenfahrzeuge im Gleis. Eine Einführung", Edizioni R Oldenbourg, Monaco 1982.
- [36] ORE Question C138, "Valeurs maximales admissibles de Y et Q et critères de déraillement", Rapport n.5 e n.9, Rapport final, settembre 1986.
- [37] MATSUO, "Quasi-static derailment of a wheelset", Quarterly Report RTRI, n.3, 1986, pag 94-97.
- [38] MIYAMOTO, "Mechanism of derailment phenomena of railway vehicles", Quarterly Report RTRI, vol. 37, novembre 1996, pag. 147-155.
- [39] SHUST, ELKINS, "Wheel forces during flange climb. Part I - Track loading vehicle tests. Part II - Nucars Simulation", Proceedings of IEEE/ASME Joint Railroad Conference, Boston 18-20 marzo 1997, pag. 137-155.
- [40] MAHR, LEHNA, KUHNEL, "Betrachtungen zur Entgleisungssicherheit unter besonderer Berücksichtigung der Spurkranz-Rückenführung", ZEV, Glasers Annalen, agosto 1997 pag. 451-461 e settembre 1997 pag. 509-515.
- [41] ELKINS, WU, "New criteria for flange climb derailment", Proceedings of the IEEE 2000 ASME/IEEE joint Railroad Conference, Vol. 18, pag.1-7.
- [42] TAKAI, UCHIDA, MURAMATSU, ISHIDA, "Derailment safety evaluation by analytic equations", Quarterly Report, RTRI, vol.43, settembre 2002, pag. 119-124.
- [43] CLEMENTSON, EVANS, "The use of dynamic simulation in the investigation of derailment incidents", IAVSD, Vehicle System Dynamics, Suppl. Vol. 37, 2002, pag. 338-349.
- [44] KIK, MEUSSEN, MOELLE, BERGANDER, VINCENT, "Comparison of results of calculation and measurements of DYSAF tests, a research project to investigate safety limits of derailments at high speed", IAVSD, Vehicle System Dynamics, Suppl. Vol. 37, 2002, pag 543-553.
- [45] NAGASE, WAKABAYASHI, SUKAHARA, "A study of the phenomenon of wheel climb derailment: results of basic experiments using model bogies", Journal of Rail and Rapid Transit, 2/2002, pag. 237-247.
- [46] LICCIARDELLO, "Il coefficiente d'attrito nei calcoli di dinamica ferroviaria. Fenomenologia del contatto e modelli matematici", Ingegneria Ferroviaria, luglio-agosto 2003, pag. 645-657.
- [47] BARBOSA, "A 3D contact force safety criterion for flange climb derailment of a railway wheel", IAVSD, Vehicle System Dynamics, vol. 42, novembre 2004, pag. 289-300.
- [48] UNI-EN 14363, "Railway applications. Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles. Testing of running behaviour and stationary tests", 2005.
- [49] TCRP Report 71, Track Related Research Vol. 5, TRB, Transportation Research Board, Washington, "Flange climb derailment criteria and wheel/rail profile management and maintenance guidelines for transit operation", 2005.
- [50] WU, WILSON, "Railway vehicle derailment and prevention", in Handbook of Railway Vehicle Dynamics, a cura di S. Iwnicki, Ed. Taylor & Francis, Londra 2006, pag. 209-238.
- [51] MATSUMOTO, et alii, "A new monitoring method of train derailment coefficient", Institution of Engineering and Technology. Int. 1, Conference on Railway Condition Monitoring Proceedings 2006, pag. 136-140.
- [52] TSI, "Technical Specification for Interoperability. Rolling Stock Sub-System".
- [53] TROISI, CORAZZA, COSTA, MUSELLA, "Sulla flessibilità laterale degli aghi per deviatoi", Ingegneria Ferroviaria, gennaio 2007, pag. 3-15.
- [54] BRABIE, ANDERSSON, "Analysis of vehicle features influencing train derailment processes and consequences", ZEVrail, novembre 2008, numero speciale per la 38° Schienenfahrzeuge Tagung di Graz, pag. 172-184.

**Sommaire**  
LE DÉRAILLEMENT - PLUS DE CENT ANS DE RECHERCHES SUR UN PROBLÈME COMPLEXE. LES ORIGINES ET L'ÉCOLE FRANÇAISE

Ceci est le premier article d'une série dédiée au problème du déraillement. La vaste littérature technique sur ce problème est analysée historiquement, après avoir été subdivisée en parties homogènes reflétant les contributions de chercheurs français, japonais et d'autres groupes internationaux. Ce travail est dédié aux auteurs français POCHET, NADAL, MARIÉ et CHARTET et il se conclut avec une proposition d'évolution des études sur la prévention du déraillement, basée sur les risques statistiques qui le caractérisent et sur la phénoménologie dynamique.

**Summary**  
DERAILMENT – MORE THAN 100 YEARS OF RESEARCH ON A COMPLEX PROBLEM – THE BEGINNINGS AND THE FRENCH SCHOOL

This is the first of a series of papers regarding derailment. The extensive technical literature about this problem is here analyzed from an historical point of view and grouped according to homogeneous parts representing the contributions of French, German, Japanese and international researchers. This paper focuses on the French authors POCHET, NADAL, MARIÉ and CHARTET ending with a first proposal of evolution of derailment prevention studies, based on both the relevant stochastic risks and dynamic phenomenology.

**Zusammenfassung**  
DIE ENTGLEISUNG - EIN MEHR ALS HUNDERTJAHRIGER FORSCHUNGSPROZESS ÜBER EINEM UMSTÄNDLICHEN PROBLEM. DER ANFANG UND DIE FRANZÖSISCHE SCHULE.

Erster Artikel einer Reihe über die Entgleisung. Geschichtliche und kritische Analyse einer breiten technischen Literatur, in vier Teilen gegliedert, die der französischen, deutschen, japanischen und internationalen Forschung gewidmet sind. Hier werden die französischen POCHET, NADAL, MARIÉ und CHARTET in Betracht genommen. Dann wird ein Vorschlag für die weitere Entwicklung dieser Studien erarbeitet, die auf statistischen Risiken und laufdynamischen Parametern begründet ist.

### LINEE GUIDA PER GLI AUTORI

(Istruzioni su come presentare gli articoli per la pubblicazione sulla rivista "Ingegneria Ferroviaria")

**La collaborazione è aperta a tutti** - L'ammissione di uno scritto alla pubblicazione non implica, da parte della Direzione della Rivista, riconoscimento o approvazione delle teorie sviluppate o delle opinioni manifestate dall'Autore - I manoscritti vengono restituiti - La riproduzione anche parziale di articoli o disegni è permessa solo citando la fonte.

La Direzione della Rivista si riserva il diritto di utilizzare gli articoli ricevuti e la documentazione ad essi connessa anche per la loro pubblicazione, in lingua italiana o straniera, su altre riviste del settore edite da soggetti terzi. In ogni caso, la pubblicazione degli articoli ricevuti, anche su altre riviste avverrà sempre a condizione che siano indicati la fonte e l'autore dell'articolo.

Al fine di favorire la presentazione delle memorie, la loro lettura e correzione da parte del Comitato di Redazione nonché di agevolare la trattazione tipografica del testo per la pubblicazione su "Ingegneria Ferroviaria", si ritiene opportuno che gli Autori stessi osservino gli standard di seguito riportati.

**L'articolo** dovrà essere necessariamente su supporto informatico, preferibilmente in formato WORD per Windows, con il testo memorizzato su un supporto informatico idoneo ed accettato dalla redazione (CD-Rom, DVD, pen-drive...) ed una stampa su carta.

Tutte le figure (fotografie, disegni, schemi, ecc.) devono essere progressivamente richiamate nel corso del testo. Le stesse devono essere fornite complete della relativa didascalia. Tutte le figure devono essere inserite su supporto informatico (CD-Rom, DVD o Pen Drive) e salvate in formato TIFF o EPS ad alta risoluzione (almeno 300 dpi). E' richiesto inoltre l'inserimento nei suddetti supporti delle stesse immagini ma in formato compresso .JPG (max 50KB per immagine).

E' consentito, a titolo di suggerimento, includere a titolo di bozza di impaginazione un'ulteriore copia cartacea che comprenda l'inserimento delle figure nel testo.

Si pregano i signori autori di utilizzare rigorosamente, nei testi presentati, le unità di misura del Sistema Internazionale (SI), utilizzando le relative regole per la scrittura delle unità di misura, dei simboli e delle cifre.

All'Autore di riferimento è richiesto di indicare un indirizzo di posta elettronica per lo scambio di comunicazioni con il Comitato di Redazione della rivista e di sottoscrivere apposita liberatoria per la pubblicazione degli articoli.

*Per eventuali ulteriori informazioni sulle modalità di presentazione degli articoli contattare la Redazione della Rivista - Tel. 06.4827116 - Fax 06.4742987 - redazioneif@cifi.it*