

(Fonte - Source: **Heumann**, GrundZuge Der Spurfuhrung, Elektrische Bahnen, 1950-1953)



Note sullo sviluppo di un pensiero scientifico originale nelle ferrovie La marcia in rettilineo e in curva

Notes on the development of an original scientific thought in the rail system Running on a straight track and cornering

Massimiliano BRUNER^(*)
Giuseppe Romolo CORAZZA^(**)

Sommario - Questo articolo si propone di analizzare l'evoluzione storica e tecnica del pensiero scientifico sul comportamento dei veicoli ferroviari, mentre si marcia su rettilineo e in curva. Il punto di vista di molti studiosi di argomenti ferroviari e approcci meccanici viene presentato e unito alla realtà operativa, riferendosi dall'inizio dell'uso ferroviario, attraverso l'idealizzazione nella modellazione, per poter studiare il problema dell'interfaccia ruota-rotaia.

1. Introduzione

1.1. Questa nota mira a tracciare un quadro generale dei saperi scientifici ferroviari, nati in ambito ferroviario ed accademico (Fig. 1) con esclusione di quelli derivati da altri settori industriali ed applicati nelle ferrovie.

Summary - This paper aims about the historical and technical evolution of scientific thought in railway vehicle behaviour, while running on straight track and cornering. The point of view of many railway scientists and mechanical approaches are presented and joined to the operational reality, referring from the beginning of railway use, through the idealization in modelling, to be able study the problem of wheel-rail interface.

1. Introduction

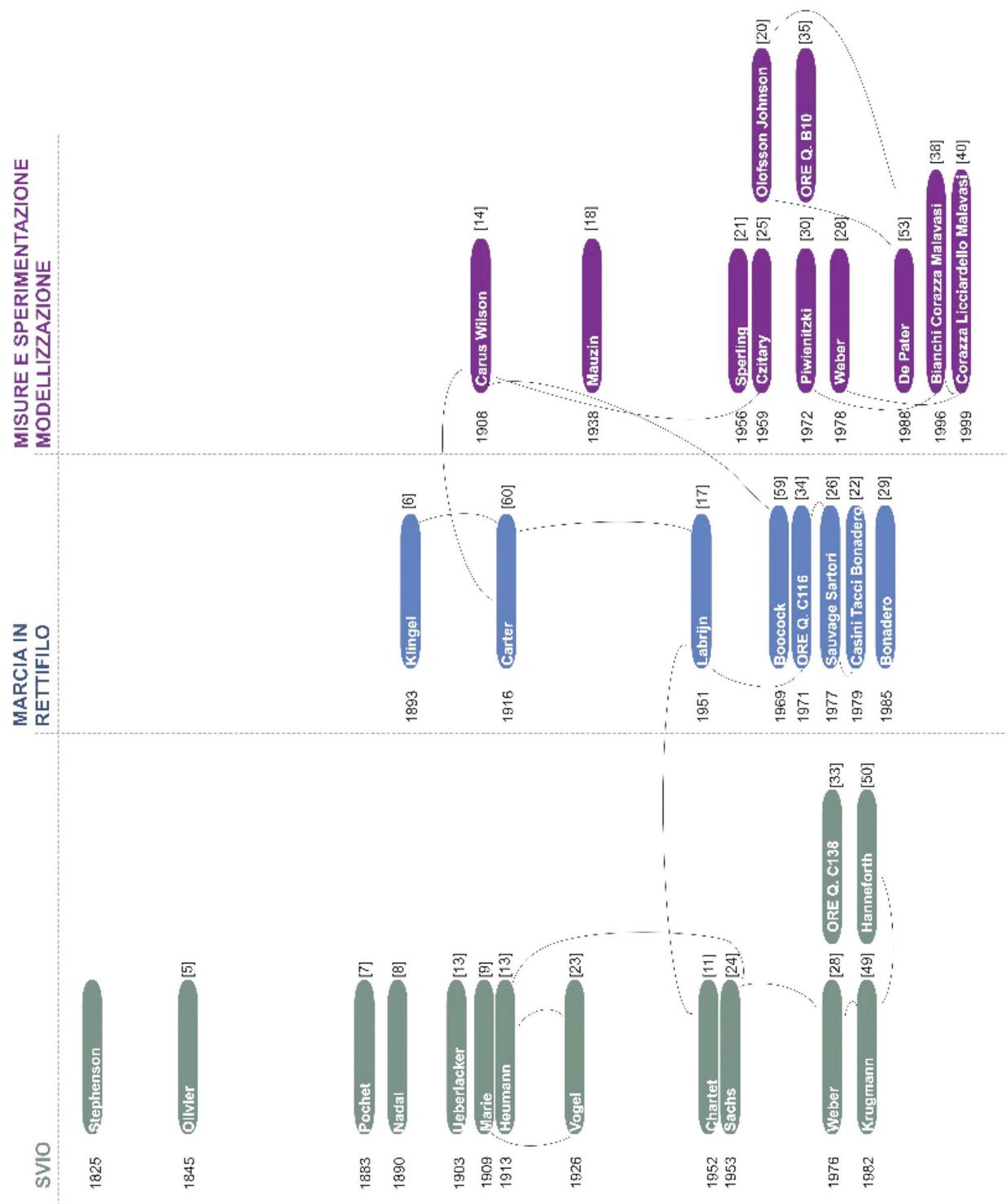
1.1. This note aims to outline a general framework of railway scientific knowledge, born in the railway and academic fields (Fig. 1), with the exclusion of those derived from other industrial sectors and applied in railways. It

^(*) Development and Innovation in Transport System (DITS) Spin-Off Sapienza, Università di Roma.

^(**) Prof. a.r. Sapienza, Università di Roma - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale (DICEA).

^(*) Development and Innovation in Transport System (DITS) Spin-Off Sapienza, University of Rome.

^(**) Sapienza, University of Rome - Department of Civil, Constructional and Environmental Engineering (DICEA), Prof. is R.



(Fonte: elaborazioni degli Autori - Source: elaborations of the Authors)

Fig. 1 - Schema genealogico dello sviluppo della ricerca scientifica ferroviaria; i punti nodali sono contrassegnati dal nome dell'autore della ricerca o dal gruppo di lavoro; il numero in "[]" rappresenta il riferimento bibliografico; con questa indicazione ogni linea che collega più nodi fornisce una bibliografia completa sul tema; i punti nodali sono altresì contrassegnati dalla data della prima pubblicazione sul tema.

Fig. 1 - Genealogical diagram of the development railway scientific research; the nodal points are marked by the name of the research author or the work group; the number in "[]" represents the bibliographic reference; with this indication each line connecting several nodes provides a complete bibliography on the subject; the nodal points are also marked by the date of the first publication on the topic.

Essa trae origine dalla approfondita analisi bibliografica in ([1], [2], [3], [4]). Il metodo seguito consiste nel richiamare i principali attori della creazione dei saperi, fornendo brevi note sui contenuti nonché le più importanti segnalazioni bibliografiche. Lo strumento così elaborato è utile in vari lineamenti di formazione aziendale di ingegneri ferroviari e come guida autodidattica.

1.2. È bene precisare che tanto la scelta degli studi ed dei relativi sviluppatori quanto quella dei riferimenti, non sfuggono ad una certa soggettività, di cui gli autori della presente memoria hanno coscienza; inoltre la completezza soffre della pratica “inaccessibilità” di talune fonti: si pensi, ad esempio, alla letteratura scientifica ferroviaria russa e dei paesi dell'est oppure a quelle asiatiche emergenti.

1.3. È possibile allora delineare il diagramma logico-temporale della formazione del pensiero scientifico ferroviario che rappresenta in tale memoria il “filo storico-scientifico” della esposizione. Nei punti nodali del diagramma sono riportati i nomi o le denominazioni degli autori di ricerche di rilievo, mentre i collegamenti fra essi rappresentano la comunanza di interesse per la materia trattata. I numeri in parentesi quadra rimandano alla bibliografia in calce. In quanto segue vengono presentati brevi esplicazioni e commenti sui singoli contributi.

2. La nascita delle ferrovie

2.1. La rivoluzione industriale inglese richiese presto lo spostamento di quantità ingenti di prodotti finiti e di materie prime; anche le distanze di trasporto crescevano, seguendo la diffusione della produzione industriale sui mercati. L'unico mezzo di trasporto terrestre, allora disponibile, era quello a trazione animale ed una sua espansione capace di far fronte alle nuove esigenze avrebbe avuto come conseguenza un accrescimento smisurato del fabbisogno di animali foraggi e cereali, tale da risultare incompatibile con gli spazi agricoli disponibili ovvero con le esigenze alimentari della popolazione.

In ambienti industriali nacque e prese vigore l'idea di ricercare un sistema di trasporto innovativo capace di prestazioni più elevate e fondato sull'impiego di tecnologie che avevano già dato buona prova di sé nelle miniere: si trattava della macchina a vapore e dei treni di vagonetti su guida vincolata. Sebbene questi due strumenti venissero impiegati in miniera indipendentemente l'uno dall'altro, i tentativi di usare la macchina a vapore nella trazione terrestre erano ben noti e numerosi, a cominciare dal carro di CUGNOT, al battello di FULTON, da due prototipi di locomotiva a vapore per impiego in miniera, dello stesso STEPHENSON, alla locomotiva di TREVITHICK.

2.2. G. STEPHENSON, certamente sulla base di risorse finanziarie messe a sua disposizione, ideò il sistema ferroviario, sviluppandolo in tutti i suoi aspetti, dalla loco-

originates from an in-depth bibliographic analysis in ([1], [2], [3], [4]). The method followed consists in recalling the main actors of the creation of knowledge, providing brief notes on the contents as well as the most important bibliographic references. The tool thus elaborated is useful both in various key elements of corporate training for railway engineers and as a self-study guide.

1.2. *It is good to point out that both the choice of the authors and references do not escape a certain subjectivity, that the A. obviously assume; moreover, the completeness suffers from the practical “inaccessibility” of some sources: think, for example, of the Russian railway scientific literature and of the Eastern countries or the emerging Asian ones.*

1.3. *In this essay, a logical-temporal diagram of the formation of railway scientific thought represents the “historiographical-scientific thread” of the presentation. The names or titles of the authors of significant research are in the nodal points of the diagram, while the links between them represent the sharing of interest for the subject dealt with. The numbers in square brackets refer to the bibliography at the bottom. The following are brief explanations and comments on individual contributions.*

2. The formation of railways

2.1. *The English industrial revolution soon required the displacement of large quantities of finished products and raw materials; even transport distances increased, following the diffusion of industrial production on the markets. The only means of land transport, available at the time, was animal traction and its expansion capable of coping with the new requirements would have resulted in an immense increase in the needs of fodder and cereals, thus incompatible with the available agricultural spaces or with the food needs of the population.*

In industrial environments, the idea of finding an innovative transport system capable of higher performance and based on the use of technologies that had already proved good performance in mines took effect: it concerned the steam engine and guided wagons. Although these two instruments were used in mines independently of each other, attempts to use the steam engine for land transport were well known and numerous, starting from the CUGNOT wagon, FULTON's boat, two steam locomotive prototypes for use in the mine, by STEPHENSON himself, up to the TREVITHICK locomotive.

2.2. *George STEPHENSON conceived the railway system, certainly on the basis of financial resources made available to him, developing it in all its aspects, from the locomotive, to the permanent way, to the towed rolling stock, type of services to be offered and the operating rules. The first implementation was the Stockton-Darlington line in 1825, whose second centenary is coming up soon (Fig. 2).*

motiva, alla via, al materiale rimorchiato, alla tipologia dei servizi da offrire ed alle regole di esercizio. La prima realizzazione fu la linea Stockton-Darlington nel 1825, di cui presto cadrà il secondo centenario (Fig. 2).

3. Innovazioni salienti nel progetto di Stephenson

3.1. Il progetto stephensoniano incorporava una quantità di soluzioni innovative delle quali sarebbe difficile, oggi, fare un elenco completo. Tuttavia è possibile evidenziare quelle che recano un'impronta geniale caratterizzata dalla complessità dei fenomeni coinvolti, alcuni dei quali tuttora oggetto di speculazione teorica ed analisi sperimentale.

Innanzitutto colpiscono due fondamentali intuizioni: una concerne la capacità della ruota di interagire con la rotaia e trasmettere stabilmente una forza tangenziale utile alla trazione, l'altra nella definizione del profilo del cerchione e nella sua attitudine ad assicurare la marcia in curva in virtù di un bordino di modeste dimensioni.

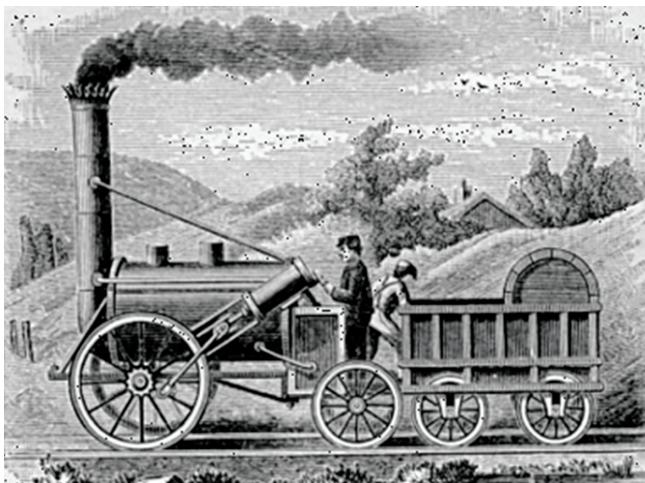
Dal punto di vista operativo è da registrare il fatto che il sistema ferroviario si apriva a sviluppi praticamente senza limiti nel trasporto di merci e viaggiatori.

3.2. Gli sviluppi che seguirono furono il frutto di saperi originali mutuati da altri settori della tecnica e adattati all'impiego ferroviario. Dei primi si farà cenno in questa nota, mentre gli altri saranno lasciati a parte, senza tuttavia sottovalutarne l'importanza. Con l'espressione "pensiero scientifico ferroviario" si intendono pertanto i saperi originali nati e sviluppati all'interno delle ferrovie.

4. La nascita del pensiero scientifico ferroviario

4.1. Il nucleo originale risale alle intuizioni stephensoniane, già richiamate, ed alle prime osservazioni sul comportamento dei veicoli durante la marcia. Fu infatti lo stesso STEPHENSON ad accorgersi che il profilo conico dei cerchioni aveva sì un effetto autocentrante ma al tempo stesso produceva fenomeni di serpeggio. Non si conoscono le riflessioni di STEPHENSON su questi argomenti, che probabilmente furono soverchiate da più pressanti problemi di sviluppo del sistema. Un auspicabile approfondimento andrebbe condotto nell'archivio STEPHENSON conservato presso la Institution of Mechanical Engineers in Inghilterra.

4.2. Utilizzando da qui in avanti come strumento di scansione temporale i nodi di Fig. 1 ovvero le pubblicazioni note e le relative date, si può legare l'inizio degli studi sull'interazione ruota-rotaia alla monografia di OLIVIER [5] apparsa a Parigi nel 1846, cioè a venti anni circa dall'inaugurazione della linea Stockton-Darlington. L'argomento affrontato era lo svio, che evidentemente creava preoccupazioni negli ambienti responsabili. Gli autori di queste note non escludono l'esistenza di altri



(Fonte: cartolina postale UK - Source: UK postcard)

Fig. 2 - Locomotion 1 museale, della linea Stockton-Darlington: si noti la sistemazione di macchinista e fuochista e si osservino anche le in moto alternativo, rotativo e traslatorio, generatrici di azioni inerziali destabilizzanti

Fig. 2 - Museum locomotion 1, of the Stockton-Darlington line: note the arrangement of the driver and the stoker and observe also the alternative, rotary and translational motion, generators of destabilising inertial actions.

3. Key innovations in the Stephenson project

3.1. The STEPHENSON project incorporates a number of innovative solutions of which it would be difficult to make a complete list today. However those bearing an ingenious imprint characterised by the complexity of the phenomena involved can be highlighted, some of which are still the subject of theoretical speculation and experimental analysis.

First of all, there are two fundamental striking insights: one concerns the wheel's ability to interact with the rail and permanently transmit a tangential force useful for traction, the other in defining the rim profile and its ability to ensure cornering by virtue of a modest sized flange.

From an operational point of view it is to be noted that the railway system was open to practically unlimited developments in the transport of goods and travellers.

3.2. The developments that followed were the result of original knowledge and knowledge borrowed from other sectors of technology, adapted to railway use. This note will outline the first, while the others will be left aside, without underestimating their importance. With the expression "railway scientific thought" we therefore mean the original knowledge born and developed within the railways.

4. The birth of railway scientific thought

4.1. The original nucleus dates back to Stephenson's insights, already referred to, and to the first observations on the behaviour of vehicles during operation. It was indeed

lavori ferroviari con carattere di ricerca, più o meno coevi. Tuttavia il lavoro di OLIVIER permette di inquadrare temporalmente l'inizio di una speculazione teorica ferroviaria, ormai svincolata dall'ambiente originario stephensoniano.

4.3. A poco meno di quarant'anni dopo, al 1883, risale il lavoro di KLINGEL [6] che interpreta in termini analitici il fenomeno del serpeggio con la nota formula della lunghezza d'onda spaziale (Fig. 3). Va aggiunto che KLINGEL affrontò anche il problema della dinamica orizzontale producendo interessanti risultati. Questo lavoro rimase però privo di sviluppi da parte dello stesso.

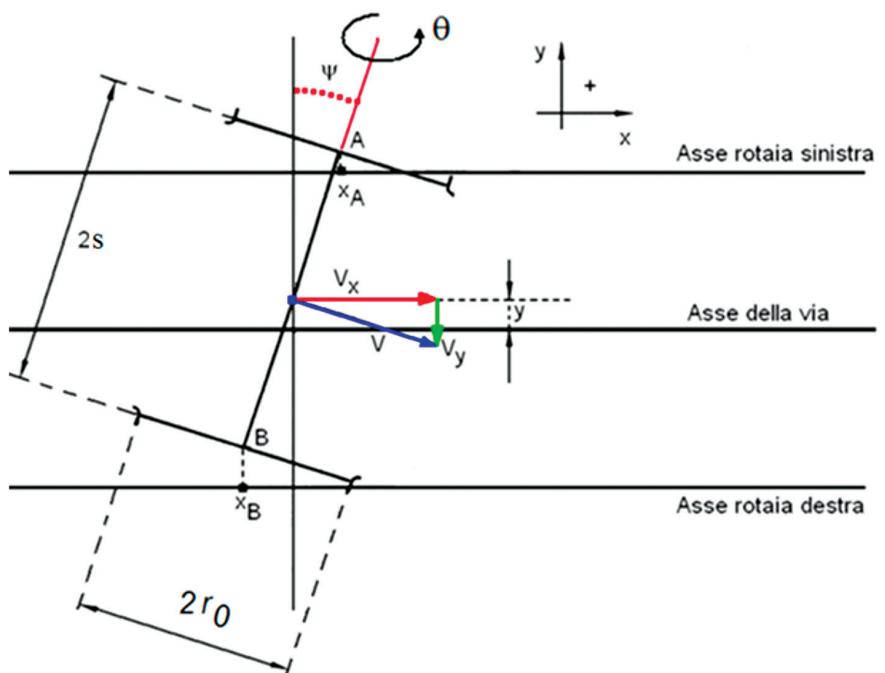
4.4. Il riferimento ad OLIVIER e KLINGEL permette di constatare che gli ingegneri dell'epoca percepissero già con chiarezza come questi temi fossero legati alla sicurezza ferroviaria ed inoltre come fossero in possesso di una cultura professionale capace di affrontarne l'analisi.

5. Parigi, Praga

5.1. Da queste città, sul finire del XIX secolo, partono idealmente altrettante linee di ricerca destinate a grandi sviluppi fino ai giorni nostri; una affronta il problema della marcia del veicolo in curva mentre l'altra pone le basi teoriche della statica del binario.

5.2. In Francia tre studiosi di ferrovia, POCHET [7], NADAL [8] e MARIÉ ([9], [10]) affrontano in successione il problema dello svio, inquadrando in una sempre più ampia prospettiva, nella quale ognuno fece progredire l'impostazione del problema. Nell'immaginario comune resta la formula di NADAL, fondata su una semplice condizione di equilibrio, delle forze al contatto bordino rotaia senza affrontare il problema della ragionevole valutazione della spinta laterale destabilizzante. Il problema dell'equilibrio statico del veicolo sul binario veniva impostato imponendo condizioni molto particolari di iscrizione vincolata, accettabili solo per locomotive a vapore a più assi accoppiati e curve di strettissimo raggio.

A differenza dei primi due, MARIÉ continuò a lungo ad occuparsi di questa materia ed in suo trattato, nel quale consolidava i suoi studi, faceva emergere due aspetti fondamentali e cioè la scarsità di conoscenze sull'attrito fra ruota e rotaia e l'impossibilità, per quei tempi, di indagini sperimentali nella dinamica della locomozione. Il problema dell'iscrizione del veicolo nella via non fece progressi.



(Fonte: appunti Lezioni "Sistemi di Trazione II", A.A.2004-2005, "SAPIENZA" Università di Roma)
 (Source: Notes on "Traction Systems II" Lessons, A.Y.2004-2005, "SAPIENZA" University of Rome)

Fig. 3 - Schema del modello analitico di KLINGEL per la sala isolata a ruote coniche in marcia, a velocità di traslazione costante, su binario in rettilineo ed eccitata al serpeggio.
 Fig. 3 - Diagram of the analytical model of KLINGEL for the isolated wheel set with conical wheels moving, at constant translation speed, on a straight track and excited at the yaw.

STEPHENSON himself who realised that the conical profile of the rims had a self-centring effect but at the same time produced yaw phenomena. We do not know STEPHENSON's considerations on these topics, which were probably out done by more pressing system development issues. A desirable in-depth analysis should be conducted in Stephenson's archive kept at the Institution of Mechanical Engineers in England.

4.2. Using hereinafter the nodes in Fig. 1 as time scan tool or the known publications and related dates, we can link the beginning of the studies on the wheel-rail interaction to the monograph of OLIVIER [5] appeared in Paris in 1846, roughly twenty years after the inauguration of the Stockton-Darlington line. The topic addressed was derailment, which evidently created concerns in the management area. The authors of these notes do not exclude the existence of other railway research works that are more or less contemporary. However, OLIVIER's work allows time framing the beginning of a theoretical railway speculation, unbiased from STEPHENSON's original environment.

4.3. The work of KLINGEL [6] which interprets in analytical terms the yaw phenomenon with the known formula of the spatial wavelength (Fig. 3) dates back to 1883, a little less than forty years later. It should be added that KLINGEL also addressed the problem of horizontal dynamics produc-

5.3. A Praga WINKLER [12], professore di scienza delle costruzioni in quell'università, presentava la sua teoria della trave con appoggio continuo indefinito, che apriva la via all'interpretazione del comportamento elastico del binario poggiato su massicciata. È da notare che, paradossalmente, i moderni binari a lunghe barre saldate sono più aderenti alla teoria di WINKLER di quanto non lo fossero i binari dell'epoca, disseminati di giunti e con attacchi delle rotaie alle traverse ancora rudimentali. Per andare oltre occorrerà attendere gli anni Venti, quando TIMOSCHENKO riprese il tema, estendendolo alla dinamica del binario, mentre un'affinamento che riguardava la discontinuità rappresentata dagli appoggi su traversa era già stato introdotto da ZIMMERMANN. Questo tema fa parte di una linea di ricerca qui non esaminata.

6. Berlino, Aquisgrana e ancora Parigi: ulteriori sviluppi

6.1. Il difficile problema della marcia in curva di un veicolo ad assi paralleli fu affrontato da due ingegneri delle ferrovie tedesche, UEBELACKER ed HEUMANN; il primo operava a Berlino il secondo prima a Metz, allora tedesca, e poi ad Aquisgrana.

L'impostazione (Fig. 4) data da UEBELACKER al problema [13] derivava dalla teoria dei moti rigidi e permetteva di calcolare la spinta esercitata dal bordino della ruota di guida contro la rotaia nel caso di iscrizione libera o vincolata, per veicoli a due o più assi paralleli. Ciò aveva valore teorico, in quanto la soluzione era obiettata da difficoltà analitiche, allora quasi insuperabili. La verifica geometrica dell'iscrizione in curva dovrà attendere i lavori di ROY [61] e VOGEL ([23], [24]) per divenire operativa.

6.2. HEUMANN ([15], [16]), sulla scia di UEBELACKER, escogitò, a prezzo di alcune ragionevoli approssimazioni, una brillante soluzione grafica (Fig. 5) che eliminava la pesantezza della soluzione analitica. HEUMANN, a differenza di UEBELACKER, proseguì questi studi fino alla fine degli anni '50, condensandoli in una monumentale serie di articoli apparsi sulla rivista Elektrische Bahnen, che riflettevano la sua attività di professore all'università di Aquisgrana. Le teorie heumanniane influenzarono a lungo il pensiero scientifico tedesco in materia. HEUMANN elaborò infine un metodo di verifica della possibilità di svio che va ben oltre le vecchie teorie di NADAL e MARIÉ, nonché il profilo antiusura dei cerchioni, denominato HEUMANN-LOTTER.

6.3. Quasi contemporaneamente al lungo sviluppo delle teorie di HEUMANN, in Francia CHARTET [11] elaborava una solida e raffinata teoria sullo svio, che affrontava in grande dettaglio l'effetto che potevano avere sul fenomeno i molteplici parametri. Ancor oggi l'uso dei diagrammi di CHARTET consente una rapida valutazione dei casi di interesse.

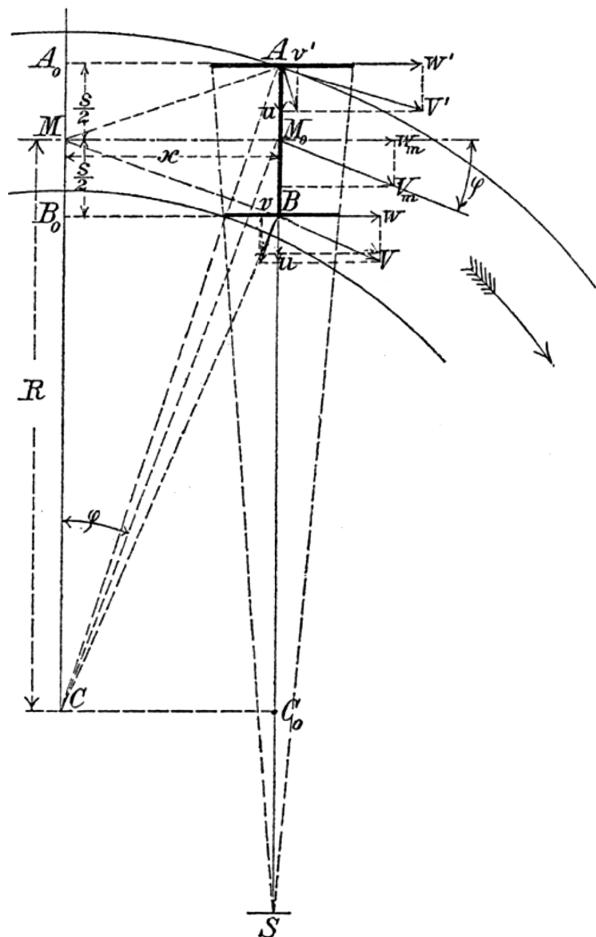
ing interesting results. This work, however, remained devoid of developments by the same.

4.4. The reference to OLIVIER and KLINGEL allows us to establish that the engineers of the time already clearly perceived how these issues were related to railway safety and moreover that they had a professional culture capable of tackling the analysis thereof.

5. Paris, Prague

5.1. At the end of the nineteenth century, as many research lines destined to great developments up to the present day, ideally start from these cities; one deals with the problem of driving the vehicle on a curve while the other sets the theoretical foundation of the track's statics.

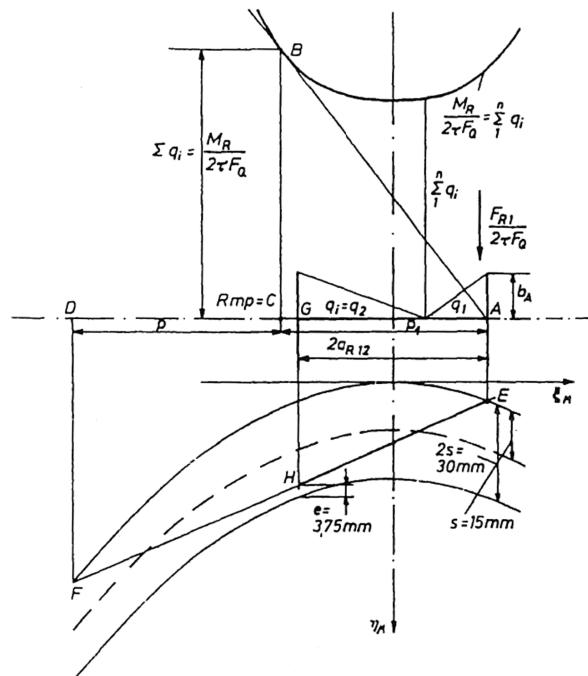
5.2. In France three railroad scholars, POCHET [7], NADAL [8] and MARIÉ ([9], [10]) address the problem of de-



(Fonte - Source: HEUMANN, GrungZuge Der Spurfuhrung, Electrische Bahnen 1950-1953)

Fig. 4 - Rappresentazione grafica della soluzione di UEBELACKER per il moto di iscrizione in curva della sala isolata.

Fig. 4 - Graphical representation of the UEBELACKER solution for running through curves of the isolated wheel set.



(Fonte - Source: HEUMANN, GrungZuge Der Spurfuhrung, Elektrische Bahnen 1950-1953)

Fig. 5 - Nella parte superiore della figura è riprodotta la soluzione grafica di HEUMANN per la determinazione della spinta di bordino e delle posizioni del centro di attrito; nella parte inferiore di un carrello in curva; le due parti sono coordinate dalla applicazione del metodo di VOGEL per l'inscrivibilità in curva di materiale a due assili.

Fig. 5 - In the upper part of the figure the graphic solution of HEUMANN is reproduced for the determination of the flange thrust and the position of the centre of friction; at the bottom a cornering bogie; the two parts are coordinated by the application of the VOGEL method for the cornering of two-axle stock.

Si noti che nelle due teorie sullo svio fanno una timida comparsa relazioni sulle forze di contatto non più in condizioni di attrito coulombiano bensì in funzione dello scorrimento fra i due organi.

7. La marcia in rettifilo

7.1. Con l'eccezione di KLINGEL gli studi fin qui richiamati si erano concentrati sul problema della marcia in curva, che all'epoca doveva dare "non pochi grattacapi". È solo all'inizio del secolo scorso che due Autori hanno dato un contributo di alto rilievo teorico-pratico alla comprensione dei fenomeni legati alla marcia in rettifilo.

7.2. Il primo, destinato a rimanere in ombra, fu il prof. CARUS-WILSON [14], coinvolto in un articolato gruppo di ricerca, cui era stato affidato il compito di indagare su un caso di usura ondulatoria, osservato in forma particolarmente aggressiva in una nuova ferrovia in India.

railments in succession, framing it in a wider perspective, in which everyone made progress in setting up the problem. NADAL's formula remains in collective imagination, based on a simple equilibrium condition, of the forces at the rail flange contact without addressing the problem of the reasonable evaluation of the destabilising lateral thrust. The problem of the static balance of the vehicle on the track was set by imposing very special conditions of constrained running, acceptable only for steam locomotives with multiple coupled axles and very tight radius curves.

Unlike the first two, MARIÉ continued to deal with this subject for a long time and in his essay, in which he consolidated his studies, he revealed two fundamental aspects: the lack of knowledge on the friction between wheel and rail and the impossibility, for those times, of experimental investigations in locomotion dynamics. The vehicle running behaviour problem on the way made no progress.

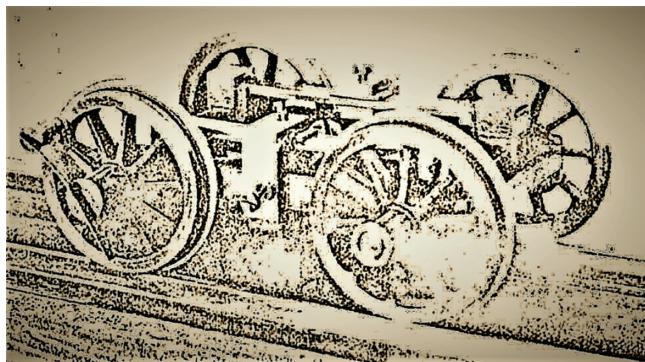
5.3. In Prague WINKLER [12], Professor of structural engineering in that University, presented his theory of the beam with continuous indefinite support, that opened the way to the interpretation of the elastic behaviour of the track resting on ballast. It is noteworthy that, paradoxically, modern tracks with long welded bars are more pertinent to WINKLER's theory than the tracks of the time, scattered with joints and with rail connections to rudimentary sleepers. To go further it will be necessary to wait until the Twenties when TIMOSCHENKO followed up the topic, extending it to the dynamics of the track, while an improvement that concerned the discontinuity represented by the supports on the sleepers had already been introduced by ZIMMERMANN. The subject is part of a research line not examined here.

6. Berlin, Aachen and again Paris: further developments

6.1. The difficult problem of the cornering of a parallel axle vehicle was addressed by two German railways engineers, UEBELACKER and HEUMANN; the first one worked in Berlin the second first in Metz, German at the time, and then in Aachen.

The setting (Fig. 4) given by UEBELACKER to the problem [13] derived from the theory of rigid motions and allowed calculating the thrust exerted by the flange of the guide wheel against the rail in the case of free or restricted operation, for vehicles with two or more parallel axles. This had a theoretical value, as the solution was overburdened by analytical difficulties, almost insurmountable at the time. The geometric verification of running through curves will have to wait for the works of ROY [61] and VOGEL ([23], [24]) to become operational.

6.2. HEUMANN ([15], [16]), in the wake of UEBELACKER, devised a brilliant graphic solution (Fig. 5) at the cost of some reasonable approximations, which eliminated the heaviness of the analytical solution. HEUMANN, unlike UEBELACKER, continued these studies until the late '50s, con-



(Fonte - Source: Engineering Review, 1908)

Fig. 6 - Carrello di CARUS-WILSON: le ruote anteriori, a destra nella foto, sono elasticizzate torsionalmente.

Fig. 6 - CARUS-WILSON bogie: the front wheels, on the right in the photo, are torsionally stretched.

L'andamento periodico di questo fenomeno con un apparentemente regolare rotolamento delle ruote sulla rotaia, indussero CARUS-WILSON ad ideare un modello di carrello in scala ridotta (Fig. 6), nel quale tre ruote erano rigidamente solidali con i rispettivi assi mentre la quarta presentava il cerchione collegato al mozzo mediante lamine flessibili che consentivano la torsione del cerchione rispetto al mozzo. Facendo avanzare il carrello su un binario era possibile distinguere due fasi di comportamento del sistema elastico-torsionale. In una prima fase le lamine si flettevano progressivamente, caricando così di energia il sistema elastico ruota-lamine-mozzo.

Successivamente, quando la deformazione raggiungeva un certo valore, l'accoppiamento ruota-rotaia, fin lì stabile, cedeva torsionalmente consentendo alla ruota di assumere la sua posizione angolare iniziale, dopo di che il fenomeno si ripeteva ciclicamente. Una deduzione obbligata riguardava il fatto che la marcia di un carrello ad assi paralleli imponeva la sovrapposizione di moti di rotolamento e scorrimento con conseguenti micro-diseguaglianze della velocità di rotazione delle due sale montate. Ciò generava forze di scorrimento. La quantizzazione dei parametri coinvolti ed il trasferimento di queste suggestive deduzioni ad un veicolo reale rimase un problema aperto, però alcuni aspetti fondamentali della marcia di un veicolo erano stati individuati ed analizzati in relazione a fatti reali.

7.3. Una prima soluzione del problema fu elaborata da CARTER nel 1916 sotto forma di un articolo apparso sul Journal della Royal Society. Questo lavoro fu successivamente ampliato ed inserito nel monumentale trattato di trazione elettrica [60] apparso nel 1922 (Fig. 7).

CARTER era un progettista di mezzi di trazione elettrica che proveniva da una formazione universitaria in fisica-matematica. Alla base della soluzione proposta c'era la schematizzazione di un carrello a due assi rigidi e ruote coniche, marciante in rettifilo su un binario privo di di-

densing them into a monumental series of articles appeared in the journal *Elektrische Bahnen*, reflecting his activity as a professor at the University of Aachen. HEUMANN's theories will influence German scientific thought on the subject for a long time. HEUMANN developed a method of verification of the possibility of derailments that goes well beyond the old theories of NADAL and MARIÉ, and the rim anti-wear profile, named HEUMANN-LOTTER.

6.3. Almost at the same time as the long development of HEUMANN's theories, in France CHARTET [11] elaborated a solid and refined theory on derailment, which dealt in great detail with the effect that the multiple parameters could have on the phenomenon. Even today the use of CHARTET diagrams allows a rapid evaluation of the cases of interest.

It is to be noted that in the two theories on derailment relations on the contact forces no longer in coulomb friction conditions appear but rather as a function of the sliding between the two bodies.

7. Running on a straight stretch

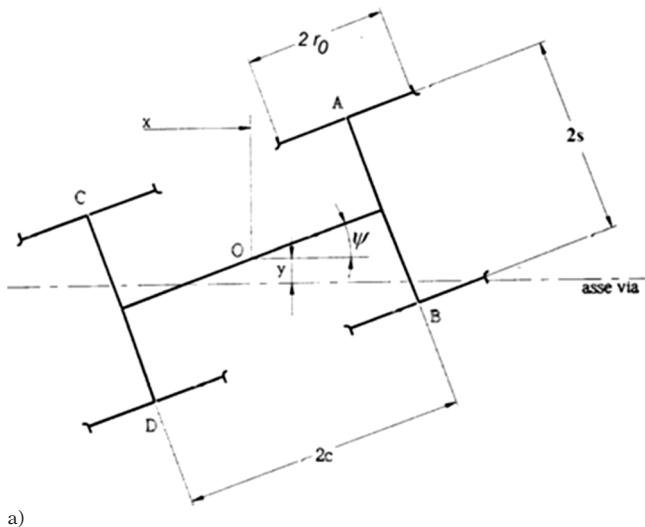
7.1. With the exception of KLINGEL studies recalled to date had focused on the issue of cornering, which at the time was to give "many concerns". It is only at the beginning of the last century that two Authors have given a significant theoretical and practical contribution to the understanding of phenomena related to running in straight stretches.

7.2. The first, destined to remain in the shade, was prof. CARUS-WILSON [14], involved in a complex research group, that was entrusted with the task of investigating a case of wave wear, observed in a particularly aggressive form in a new railway in India.

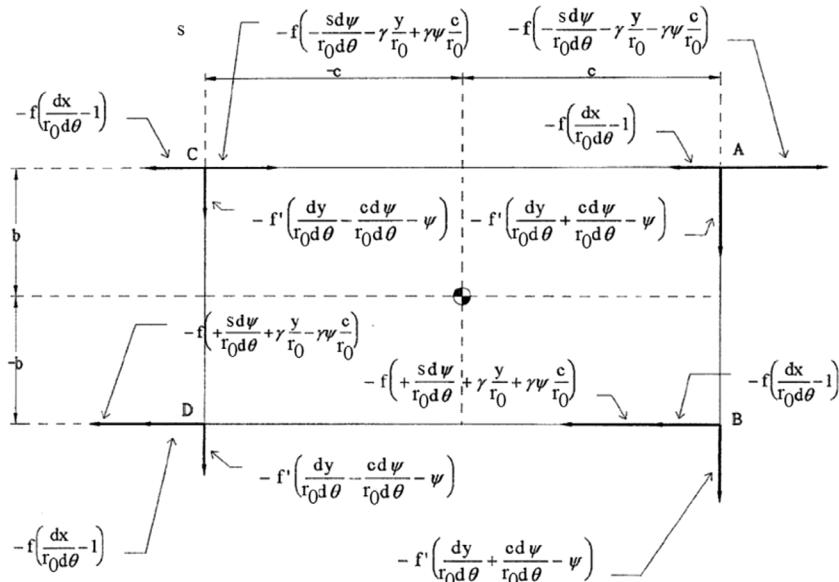
The periodic trend of this phenomenon with an apparently regular rolling of the wheels on the rail, led CARUS-WILSON to devise a small-scale bogie model (Fig. 6), in which three wheels were rigidly integral with the respective axles while the fourth had the rim connected to the hub by means of flexible foils that allowed the torsion of the rim with respect to the hub. Moving the bogie forward on a track two stages of the elastic-torsional system behaviour could be distinguished. In a first step the foils progressively bent thus loading the wheel-foils-hub elastic system with energy.

Later, when the deformation reached a certain value, the wheel-rail coupling, stable up to that point, torsionally yielded allowing the wheel to assume its initial angular position, after which the phenomenon is repeated cyclically. An obligatory conclusion concerned the fact that the operation of a bogie with parallel axles imposed the overlapping of rolling and sliding motions with consequent micro irregularities of the rotation speed of the two assembled wheel sets. This generated sliding forces. The quantification of the parameters involved and the transfer of these suggestive conclusions to a real vehicle remained an open issue, but

fetti ed in assenza di spinte di bordino. I quattro punti di contatto ruota-rotaia definivano i vertici di un rettangolo, la cui configurazione restava invariante durante il moto, ciò che equivaleva a trascurare eventuali effetti del profilo trasversale curvo delle rotaie.



a)



b)

(Fonte: appunti Lezioni "Sistemi di Trazione II", A.A.2004-2005, "Sapienza" Università di Roma)
(Source: Notes on "Traction Systems II" Lessons, A.Y.2004-2005, "Sapienza" University of Rome)

Fig. 7 - a) Schema semplificato del modello analitico di CARTER: veicolo a due assi paralleli a ruote coniche in marcia su rettifilo; gli scorrimenti al contatto ruota-rotaia vengono calcolati imponendo due diversi spostamenti, il primo determinato dalle variazioni dx , dy e $d\varphi$, il secondo dalla rotazione $d\theta$, imposto ad entrambe le sale. b) Tali scorrimenti derivano dalla differenza fra i due spostamenti da cui originano le conseguenti forze di pseudo slittamento.

Fig. 7 - a) Simplified diagram of the analytical model of CARTER: vehicle with two parallel axles with conical wheels running on a straight stretch; the flows at wheel-rail contact are calculated by imposing two different displacements, the first determined by the dx , dy and d variations, the second by d rotation, imposed on both wheel sets. b) These flows derive from the difference between the two displacements from which the resulting pseudo-slipping forces originate.

some fundamental aspects of a vehicle's operation had been identified and analysed in relation to real facts.

7.3. A first solution to the problem was worked out by CARTER in 1916 in the form of an article in the Royal Society Journal. This work was subsequently expanded and included in the monumental essay [60] on electric traction by CARTER in 1922 (Fig. 7).

CARTER was a designer of electric traction vehicles that came from a university education in physics and mathematics. The schematisation of a bogie with two rigid axles and conical wheels was at the base of the proposed solution, travelling on a straight stretch on a flawless track and in the absence of flange thrusts. The four wheel-rail contact points defined the vertices of a rectangle, whose configuration remained invariant during motion, which was equivalent to neglecting any effects of the curved transverse profile of the rails.

The new element introduced by CARTER in his theoretical model was the assumption of a linear relationship of causality between flows at the points of contact and reaction forces opposed to them. The linear bond between flow and reactive force was, in turn, active until reaching a limit represented by the reaction in the coulomb sliding friction condition. A single bond was valid for all contact points.

Starting from a generic initial position an infinitesimal displacement was imposed to the bogie with longitudinal, transverse and rotation components around a vertical axis. This displacement being assigned to the centre of the bogie (that is at the centre of the invariant rectangle) it was possible to calculate those of the four vertices. The displacement was not dependant on the wheel rolling, whereby the latter was made to operate by requiring identical infinitesimal rotation from the two wheel sets. This hypothesis is perfectly valid if the two wheel sets are mechanically coupled, while it is only reasonably accurate if they are independent.

The difference between the displacements calculated in the two modes just mentioned represents sliding in the wheel-rail contact and therefore forces in opposition to it.

Thus CARTER outlined a complete picture of the forces acting on the upper surface of the rail, where other external forces like traction, resistance to motion and centrifugal or compensation forces, although known, could return. The resulting equations of equilibrium were differential equations

L'elemento nuovo introdotto da CARTER nel suo modello teorico fu l'ipotesi di un legame lineare di causalità fra scorrimenti nei punti di contatto e forze di reazione opposte ad essi. Il legame lineare tra scorrimento e forza reagente era, a sua volta, attivo fino al raggiungimento di un limite rappresentato dalla reazione in condizione di attrito radente coulombiano. Un unico legame valeva per tutti i punti di contatto.

A partire da una generica posizione iniziale veniva imposto al carrello uno spostamento infinitesimo con componenti longitudinale, trasversale e di rotazione attorno ad un asse verticale. Assegnato questo spostamento al centro del carrello (ovvero al centro del rettangolo invariante) era possibile calcolare quelli dei quattro vertici. Lo spostamento non dipendeva dal rotolamento delle ruote, per cui quest'ultimo veniva fatto intervenire imponendo alle due sale montate un'identica rotazione infinitesimale. Questa ipotesi è perfettamente valida se le due sale montate sono meccanicamente accoppiate, mentre è solo ragionevolmente approssimata se esse sono indipendenti.

La differenza fra gli spostamenti calcolati nei due modi appena accennati rappresenta scorrimenti nel contatto ruota-rotaia e quindi forze in opposizione ad essi.

In tal modo CARTER tratteggiava un quadro completo delle forze agenti nel piano del ferro, nel quale potevano rientrare, purché note, altre forze esterne come trazione, resistenze al moto e forze centrifughe o di compensazione. Le conseguenti equazioni di equilibrio erano equazioni differenziali capaci di descrivere nella sua completezza il moto di un carrello, dai fenomeni di serpeggio fino all'individuazione di una velocità critica, quest'ultima con valori che, a quei tempi, apparivano ben al di là di ogni prospettiva di ragionevole sviluppo.

8. Una complessa fase di transizione

8.1. Al lettore che avesse avuto la pazienza di leggere fin qui non saranno certamente sfuggiti alcuni aspetti comuni alle ricerche finora richiamate, consistenti in:

- a) gli autori sono singoli, nessuna ricerca presenta firme comuni, né sono espressi richiami bibliografici di altre fonti;
- b) le risorse impiegate non vanno oltre l'ingegno, carta e penna;
- c) manca la sperimentazione, nonostante si senta la necessità;
- d) il progresso legato agli studi in questione è lento e si dilata su un arco di cento anni dall'inizio della ferrovia;
- e) i risultati così faticosamente ottenuti sono coerenti fra loro.

La ricerca ferroviaria prosegue secondo le modalità appena elencate fino agli anni cinquanta ed oltre con as-

able to describe the motion of a bogie in its entirety, from yaw phenomena to the identification of a critical speed, the latter with values that, at that time, appeared to be well beyond any reasonable development perspective.

8. A complex transition phase

8.1. *The reader with the patience to read this far will certainly have noticed some aspects common to research referred to little by little, consisting of:*

- a) *the authors are individual, no research is signed in common, nor are bibliographic references from other sources referred to;*
- b) *the resources used do not go beyond intellect, paper and pen;*
- c) *experimentation is lacking, despite the need;*
- d) *the progress linked to the studies in question is slow and expands over a period of one hundred years from the beginning of the railway;*
- e) *the results so laboriously obtained are coherent with each other.*

Railway research continues with an absolute primary role until the fifties and beyond according to the modalities just listed. Far from disappearing, it survives in a marginal, if not quantitative, condition. With the beginning of the fifties, when "Reconstruction" had finished or almost, there is a series of facts and circumstances that will have a decisive impact on the progress of railways.

In particular:

- f) *the first systems for measuring wheel-rail interactions are designed and developed;*
- g) *national or international research groups are set up focused on specific topics;*
- h) *the abilities of computational tools and dynamic simulation are expanded;*
- i) *the industry gradually enters the sector;*
- j) *multiple signatures and ponderous bibliographies supplement scientific publications.*

All this reveals a framework of new interests linked to high speed, which until then had been unpredictable.

Already in the immediate pre-war period, 200 km/h trains were circulating in Europe performing commercial services (just remember our ETR 200 electric train and the German Fliegender-Hamburger diesel train). This allowed us to presuppose the existence of ample scope for development to be explored.

The initiative was taken by the French railways ([18], [19]) that in 1954 and 1955 established two speed records at 241 and 341 km/h, using normal stock on a straight stretch line of about 40 km with track mounted with 49 kg/m rails and laid on a ballast. Anyone can follow on the Internet the complete filmography of French speed records. M. PARMEN-

soluto protagonismo. Lungi dallo scomparire, essa sopravvive in condizione di marginalità, se non altro quantitativa. Con l'inizio degli anni cinquanta, finita o quasi la "Ricostruzione", si verifica una serie, di fatti e circostanze che imprimeranno una svolta decisiva al progresso delle ferrovie.

In particolare:

- f) vengono ideati e sviluppati i primi sistemi di misura delle interazioni ruota-rotaia;
- g) si costituiscono gruppi di ricerca nazionali o internazionali focalizzati su temi specifici;
- h) si ampliano le capacità degli strumenti computazionali e di simulazione dinamica;
- i) l'industria entra gradualmente nel settore;
- j) firme multiple e ponderose bibliografie integrano le pubblicazioni scientifiche.

Tutto ciò lascia intravedere un quadro di interessi nuovi legato all'alta velocità in misura fino ad allora imprevedibile.

Già nell'immediato anteguerra circolavano in Europa treni da 200 km/h in servizio commerciale (basti ricordare il nostro elettrotreno ETR 200 ed il treno tedesco diesel Fliegender-Hamburger). Ciò lasciava presupporre l'esistenza di ampi margini di sviluppo da esplorare.

L'iniziativa fu presa dalle ferrovie francesi ([18],[19]) che nel 1954 e nel 1955 stabilirono due primati di velocità a 241 e 341 km/h, utilizzando materiale normale su un tratto di linea in rettilineo di 40 km circa con binario armato con rotaie da 49 kg/m e posato su massicciata. Chiunque può seguire su Internet la filmografia completa dei record di velocità francesi. A dirigere l'operazione erano M. PARMENTIER, direttore del Materiale Rotabile SNCF e M. NOUVION, direttore dell'esperimento.

Gli eventi si susseguirono veloci, perché dopo l'inaugurazione del Tokaido Shinkansen nel 1964, altre reti svilupparono e realizzarono progetti AV, tutti posti in funzione alla fine del millennio. Solo l'iniziativa inglese venne abbandonata per problemi con il treno APT, forse derivati dall'eccesso di innovazione che incorporava.

Prima di riprendere la descrizione dei principali capisaldi di ricerca è bene richiamare l'attenzione sul diaogramma di flusso (Cfr. Fig. 1) che si articola secondo tre direttive nettamente distinte. La prima, contrassegnata dalla lettera (A), riguarda la marcia in curva soprattutto in relazione allo svio: è un tema che nasce con l'inizio delle ferrovie e si sviluppa sino ai giorni nostri, come dimostra l'inserzione di questo tema nel programma di ricerca scientifica dell'UIC.

La seconda linea (B) si sviluppa sul tema della marcia in rettilineo: essa parte molto più tardi con KLINGEL per poi prendere vigore e continuità solo a '900 inoltrato, con CARUS-WILSON e CARTER. La natura stessa dei problemi affrontati, sia sul piano sperimentale che su quello teorico,

TIER, direttore di SNCF Rolling Stock and M. NOUVION, direttore of the experiment were managing the operation.

The events took place quickly, because after the inauguration of the Tokaido Shinkansen in 1964, other networks developed and implemented HS projects, all of which were put into operation at the end of the millennium. Only the British initiative was abandoned due to problems with the APT train, perhaps derived from the excess of innovation that it incorporated.

Before resuming the description of the main cornerstones of research it is good to draw attention to the flow (Rf. Fig. 1) chart that is divided into three separate routes. The first, marked by the letter (A), concerns cornering especially in relation to derailment: it is a topic that starts with the beginning of railways and develops up to the present day, as evidenced by the introduction of this topic in the UIC research programme.

The second line (B) develops the topic on operation on a straight stretch: it begins a good deal later with KLINGEL then taking effect and continuity only in the late Twentieth Century, with CARUS-WILSON and CARTER. The very nature of the problems addressed, both on the experimental and the theoretical level, imposed on them the use of only theoretical tools to express the periodicity of the rolling phenomena and of the dependence of the sliding contact forces. In other words, the Coulomb friction hypothesis was no longer considered, which, however, appears again yet today in some studies on the stability of derailment in curves. Unlike the other two the third line (C) is purely instrumental as the solutions to problems that it has, come together in the other two topics, fostering progress. Finally, and for the sake of completeness, a fourth line of research should be mentioned, with a unitary feature of the developed topic, which is that of wave wear. There appear to be at least 500 theoretical and/or experimental works in literature, all based on brilliant methodologies and with positive results, rarely converging. It is evident that a problem with this solution is at least undetermined, most probably due to a lack of formulation [25].

8.2. A barely known impulse, predictive of future developments in the field of research on derailments, is recorded at the end of the first world war, when it was formed at the initiative of the Association of German railways, a strong research team, with ample means. The methodology chosen was based on experimentation and on the theoretical in-depth analysis of the results of the measures. The war destroyed everything but a large account of the research done, appeared in the post-war period by LABRIJN ([17],[18],[19]). The force/flow diagrams with a complex curvilinear trend, now widely used, appear for the first time in this report.

8.3. Measurement studies should be mentioned about the wheel-rail interaction forces.

8.3.1. The first measuring wheel of the interaction forces Y and Q was that of OLSON and JOHNSON, based on two circular crowns of strain gauges applied on the wheel disk in

impose loro l'impiego di soli strumenti teorici per esprimere la periodicità dei fenomeni di rotolamento e di dipendenza delle forze di contatto dallo scorrimento. In altri termini essi si liberarono dall'ipotesi di attrito coulombiano, che invece ancor oggi riaffiora in taluni studi sulla stabilità allo svio in curva. A differenza dalle altre due la terza linea, C, ha carattere strumentale in quanto le soluzioni dei problemi che essa offre confluiscano negli altri due temi, favorendone il progresso. Infine e per scrupolo di completezza va ricordata una quarta linea di ricerca con marcato carattere unitario del tema sviluppato, che è quella sull'usura ondulatoria. Esisterebbero in letteratura almeno 500 lavori teorici e/o sperimentali, tutti fondati su brillanti metodologie e con positivi risultati, raramente convergenti. È evidente che un problema con tale soluzione è quanto meno indeterminato, molto probabilmente per difetto di formulazione [25].

8.2. Un impulso, poco noto, premonitore di ulteriori sviluppi nel settore di ricerca sullo svio, va registrato al termine del primo dopoguerra, quando si costituì, per iniziativa dell'associazione delle ferrovie tedesche, un forte gruppo di ricerca, dotato di ampi mezzi. La metodologia scelta si basava sulla sperimentazione e sull'approfondimento teorico dei risultati delle misure. La guerra distrusse tutto ma un ampio resoconto delle ricerche fatte, poté apparire nel dopoguerra ad opera di LABRIJN ([17], [18], [19]). In questo rapporto fanno per la prima volta comparsa i diagrammi forza/scorrimento ad andamento curvilineo complesso, oggi ampiamente utilizzati.

8.3. È opportuno menzionare gli studi sulla misura delle forze d'interazione ruota-rotaia.

8.3.1. La prima ruota di misura delle forze d'interazione Y e Q fu quelle di OLSON e JOHNSON, basata su due corone circolari di estensimetri applicati sul disco della ruota in posizioni tali da massimizzare la sensibilità alla forza da rilevare. Una alternativa alla ruota di OLSON e JOHNSON [20] fu rappresentata dalla ruota a raggi di WEBER [28]: i raggi, collegando il mozzo al cerchione, offrivano infatti la possibilità di rilevare per via estensimetrica gli effetti delle forze da misurare. Ciò assicurava anche il vantaggio di poter dimensionare favorevolmente il sensore-raggio, ma presentava anche l'inconveniente di dover costruire ed analizzare una ruota ad hoc, che in ogni caso avrebbe avuto caratteristiche ben diverse dalla ruota di normale impiego.

Il pregio principale della ruota di OLSON e JOHNSON risiede nel permettere in modo abbastanza facile di leggere selettivamente gli effetti di Y e Q nel quadro di uno stato di sollecitazione molto complesso, come quello del disco della ruota. Al tempo stesso è da notare che una lettura più raffinata dello stato di sollecitazione anzidetto presenta un potenziale di sviluppo di particolare ampiezza. Col tempo molteplici soluzioni si sono offerte ai ricercatori del ramo e qui se ne ricordano due. La prima fu adottata dalle ferrovie francesi, nella quale vengono utilizzati fori nel disco che si comportano come amplificato-

positions such as to maximise the sensitivity to the force to be detected. An alternative to the OLSON and JOHNSON wheel [20] was represented by WEBER's spoked wheel [28]: the spokes, connecting the hub to the wheel rim, offered the possibility of measuring the effects of the forces to be measured by means of a strain gauge. This also ensured the advantage of being able to favourably size the sensor-radius, but also had the drawback of having to construct and analyse an ad hoc wheel, which in any case would have had very different characteristics from the normal use wheel.

The main advantage of the OLSON and JOHNSON wheel lies in allowing to selectively read the effects of Y and Q in an easy way in the context of a very complex state of stress, such as that of the wheel disc. At the same time it should be noted that a more refined reading of the stress state mentioned before has a particular development potential amplitude. Over time, multiple solutions have been offered to researchers in the field and two are recalled here. The first was adopted by the French railways, where disc holes are used that act as amplifiers of the stresses to be measured. The second one makes use of a thorough analysis of radial deformations along a wheel radius, which allows measuring the Y and Q forces with greater precision and determining the point of application of Q on the rolling circle.

8.3.2. *For typological completeness we must mention two other types of measuring wheel, all developed at the Sapienza University of Rome ([39], [40]), one for the measurement of displacements and rotations between hub and wheel rim in elastic wheels, experimented on the underground in Milan; the second is centred on the possibility of a wheel rim decomposition to measure separately the Y components that may be observable on the rolling circle and on the conical part of the flange. This second wheel remained a project: however, the Russian railways would have taken the idea but the results are not known.*

8.3.3. *The ZEILHOFER work group ([30], [31]) developed an interesting alternative to the wheel method in the DB, in the fifteen years following the introduction of the wheel method ([32], [36], [38]). In this solution the sensor of the forces acting on the wheel set is the axle, if we consider the axle as a beam on which forces and moments act according to which we can build the vertical and horizontal diagrams of the bending moments that stress it. Since in this process the measure directly provides all information on bending moments, it is possible to trace back the forces and moments that produce them. This requires the solution of a system of equations using a special calculator, which is part of the measurement system; it is also necessary to equip the measuring system with a sine and cosine function generator, for which maximum precision is required.*

Two other versions of this method were presented: one included the measurement of the point of application of the vertical contact forces, while the other and last in time provides a hybridised system with the wheel method, a method that allows circumventing some inaccessibility issues of the typical axle of driving wheel sets.

ri delle sollecitazioni da misurare. La seconda si avvale di una approfondita analisi delle deformazioni radiali lungo un raggio della ruota, ciò che permette di misurare con maggior precisione le forze Y e Q nonché di determinare il punto di applicazione di Q sulla fascia di rotolamento.

8.3.2. Per completezza tipologica vanno ricordati altri due tipi di ruota di misura, tutti sviluppati presso la Sapienza di Roma ([39], [40]), uno per la misura di spostamenti e rotazioni fra mozzo e cerchione nelle ruote elastiche, sperimentato sulla metropolitana di Milano; il secondo centrato sulla possibilità di una scomposizione del cerchione per misurare separatamente le componenti di Y eventualmente osservabili sulla fascia di rotolamento e sulla parte conica del bordino. Questa seconda ruota è rimasta allo stato di progetto: tuttavia l'idea sarebbe stata ripresa dalle ferrovie russe ma non se ne conoscono i risultati.

8.3.3. Una interessante alternativa al metodo della ruota fu sviluppata nella DB dal gruppo di lavoro di ZEILHOFER ([30], [31]), nei quindici anni successivi alla introduzione del metodo della ruota ([32], [36], [38]). In questa soluzione il sensore delle forze agenti sulla sala è l'assile. Se si considera l'assile come una trave su cui agiscono forze e momenti in base ai quali si possono costruire i diagrammi, verticale ed orizzontale, dei momenti flettenti che lo sollecitano. Poiché in questo procedimento la misura fornisce direttamente tutte le informazioni sui momenti flettenti, è possibile risalire alle forze e momenti che li producono. Ciò richiede la soluzione di un sistema di equazioni mediante un apposito calcolatore, che fa parte del sistema di misura; è necessario inoltre dotare il sistema di misura di un datore di funzione seno e coseno, per il quale è richiesta la massima precisione.

Di questo metodo sono state presentate altre due versioni: una prevedeva la misura del punto di applicazione delle forze verticali di contatto, mentre l'altra e ultima temporalmente prevede un sistema ibridato col metodo della ruota, metodo che permette di aggirare alcuni problemi di inaccessibilità dell'assile tipici delle sale motrici.

Approfondimenti sulla parte meccanica ed importanti risultati sperimentali ottenuti da Sapienza e Ferrovie dello Stato ([22], [27], [29], [42]) sono disponibili in letteratura.

9. La concentrazione degli sforzi di ricerca

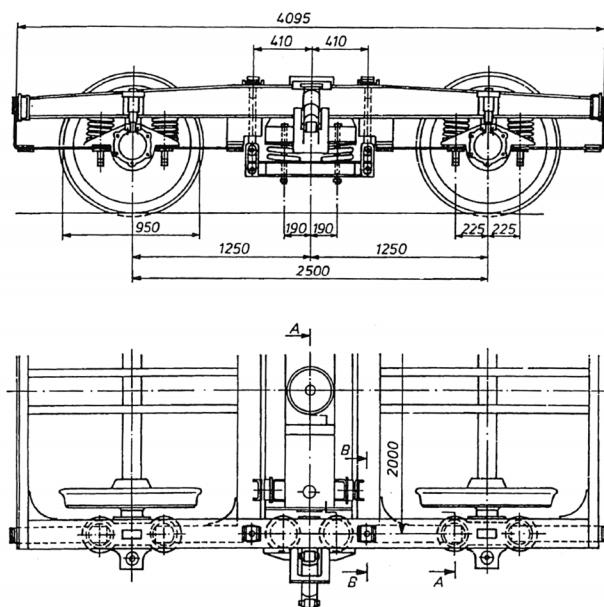
9.1. Un primo esempio della fecondità di risultati che possono scaturire dall'impiego di potenti risorse umane e di strutture sperimentali è quello del carrello MINDEN-DEUTZ, destinato ad una eccezionale diffusione nel mondo delle ferrovie (Fig. 8). Mediante una lunga e complessa serie di prove sul banco vibrante con il veicolo reale, SPERLING e POLAK [21] poterono ottimizzare la flessibilità totale della sospensione nonché la ripartizione di quest'ultima fra primaria e secondaria: in tal modo venne aperta la via all'eliminazione dei metodi di stima empirica, non sempre felice, dei suddetti parametri.

Insights on the mechanical part and important experimental results obtained by the Sapienza University and Ferrovie dello Stato ([22], [27], [29], [42]) are available in literature.

9. Concentration of research efforts

9.1. *A first example of the fruitfulness of results that may derive from the use of powerful human resources and experimental facilities is that of the MINDEN-DEUTZ bogie, destined for an exceptional diffusion in the railway world (Fig. 8). Through a long and complex series of tests on the vibrating bench with the real vehicle, SPERLING and POLAK [21] were able to optimise the total flexibility of the suspension and the division of the latter between primary and secondary: by doing this the way was opened to the elimination of empirical estimation methods of the aforementioned parameters, not always appropriate.*

9.2. *The example just quoted, far from being isolated, found impetus under the auspices of the ORE, that until the end of the last century addressed the main topics of railway research through study groups endowed with adequate human and material resources. The work group, later "absorbed" in the UIC, was divided into study commissions, composed essentially of railway representatives,*



(Fonte - Source: HEUMANN, GrungZuge Der Spurfuhrung, Electrische Bahnen 1950-1953)

Fig. 8 - Il carrello MD50 di FIRMA-KLOCKNER-HUMBOLDT-DEUTZ (BRD), nel quale per la prova-molle, venne ottimizzata sperimentalmente l'elasticità della sospensione e la sua ripartizione fra sospensione primaria e sospensione secondaria.

Fig. 8 - The MD50 bogie by FIRMA-KLOCKNER-HUMBOLDT-DEUTZ (BRD), in which the elasticity of the suspension and its distribution between primary and secondary suspension was optimised experimentally for the spring-test.

9.2. L'esempio appena citato, lungi dal restare isolato, trovò impulso sotto l'egida dell'ORE, che fin verso la fine del secolo scorso affrontò i principali temi della ricerca ferroviaria mediante gruppi di studio dotati di adeguate risorse umane e materiali. Il gruppo di lavoro, in seguito "riassorbito" nell'UIC, era suddiviso in commissioni di studio, composte essenzialmente da esponenti delle ferrovie, che aderivano ad un determinato programma, con l'aggiunta di ricercatori esterni, per lo più di estrazione universitaria. I temi di ricerca venivano denominati con il termine francese di "Question" seguito da una sigla alfanumerica. Qui se ne richiameranno le principali e cioè la C138 e la C116 ([33], [34], [35], [37]).

9.2.1. Il lavoro della *Question C138* era orientato alla ricerca di conferme, condotta da SNCF ed in particolare dagli studi teorico-sperimentali del gruppo di PRUD'HOMME ([26], [48], [62], [64]). Il Lavoro fu incentrato sul tema dello svio, che si era finalmente aperto alla sperimentazione su larga scala con le esperienze dei carri deragliatori. Mentre POCHET e successori, fino ad HEUMANN e CHARTET, avevano studiato l'equilibrio di 2 corpi, ruota e rotaia, premuti l'uno contro l'altro, ricercando una condizione limite di stabilità, la C138 si concentrò molto più realisticamente sulla deformabilità elastoplastica della via per effetto delle forze Y e Q. La condizione limite, non più di equilibrio, veniva identificata nella transizione dal comportamento elastico a quello plastico. Il lavoro si sviluppò fra il 1977 ed il 1986, articolandosi in 10 Rapporti, di cui 8 resi pubblici.

L'attività sperimentale svolta su veicoli a due assi e quelli a carrelli, per moto a bassa velocità, fu eseguita per i primi dalle ferrovie rumene CFR e per i secondi dalle ferrovie inglesi BR. Il binario di prova era affiancato da una struttura ad esso parallela sulla quale poteva scorrere un attuatore, capace di applicare una forza trasversale sul primo asse in modo da deformare trasversalmente la via; le forze Y e Q agenti venivano misurate direttamente sulla rotaia, per via estensimetrica. Per le molteplici misure prodotte, i risultati venivano elaborati mediante metodi statistici, metodologia fino a quel momento inusuale.

Le prove di carattere quasi-statico eseguite dovevano essere ovviamente estese al campo dinamico, sviluppo che avvenne su varie reti europee con l'impiego di carrozze di diverso tipo attrezzate per la misura delle forze Y e Q in condizioni di normale esercizio per centinaia di km.

I risultati ottenuti ed elaborati costituiscono il primo esempio di problema "Big Data". La soluzione è ottenuta attraverso un accurato procedimento numerico, del tutto trasparente e documentato nei Report della C138. Ciò rappresenta un "unicum", ancor oggi valido che potrebbe trovare applicazione nella procedura di programmi di simulazione aventi i medesimi scopi.

Il risultato finale fu quello, abbastanza scontato, di confermare su larga scala la formula di PRUD'HOMME, ricavata nelle ricerche SNCF ([62], [64]) con deragliatori.

who adhered to a certain programme, with the addition of external researchers, mostly originating from the university. The research topics were named with the French term "Question" followed by an alphanumeric abbreviation. The main ones will be recalled here: C138 and C116 ([33], [34], [35], [37]).

9.2.1. The work of Question C138 was oriented to the search for confirmations, conducted by SNCF and in particular by the theoretical-experimental studies of the PRUD'HOMME group ([26], [48], [62], [64]). The Work focused on derailment, which had finally opened up to large-scale experimentation with the experiences of derailleur carriages. While POCHET and successors, up to HEUMANN and CHARTET, had studied the balance of 2 bodies, wheel and rail, pressed against each other, researching a stability limit condition, the C138 focused much more realistically on elastoplastic deformability of the permanent way due to the Y and Q forces. The limit condition, no longer in equilibrium, was identified in the transition from elastic to plastic behaviour. The work developed between 1977 and 1986, distributed in 10 Reports, of which 8 were made public.

The Rumanian railways CFR carried out the experimental activity on two axle vehicles on low speed movement while for the English BR it was carried out on bogies. The test track was flanked by a structure parallel to it on which an actuator could slide, capable of applying a transverse force on the first axle so as to transversely deform the permanent way; the acting forces Y and Q were measured directly on the rail, by means of a strain gauge. For many measures, the results were processed using statistical methods, hitherto unusual methodology.

The quasi-static tests carried out had to be obviously extended to the dynamic field, a development that occurred on various European networks with the use of carriages of different types equipped for the measurement of the Y and Q forces under normal operating conditions for hundreds of km.

The results obtained and processed are the first example of a "Big Data" problem. The solution is obtained through an accurate fully transparent numerical procedure and documented in the C138 Reports. This represents a "unicum", still valid today that could be applied in the procedure of simulation programmes having the same aims.

The end result was the quite obvious one, to confirm the PRUD'HOMME formula on a large scale, obtained in SNCF researches ([62], [64]) with derailleurs.

9.2.2. The C116 was held in parallel with C138, except for a modest initial out of phase. His work was essentially aimed at the final representation of theoretical or technological tools intended for general use. For example, the problem of writing the equations of motion was addressed in their more general formulation; similarly the problem of the description of the measurement systems of the interaction forces, of their functional analysis as well as equipment and calibration and testing methods thereof was dealt

9.2.2. La C116 si svolse in parallelo alla C138, salvo un modesto sfasamento iniziale. Il suo lavoro fu essenzialmente volto alla rappresentazione definitiva di strumenti teorici o tecnologici destinati ad un uso generalizzato. Ad esempio fu affrontato il problema della scrittura delle equazioni del moto, nella loro formulazione più generale; analogamente veniva affrontato il problema della descrizione dei sistemi di misura delle forze d'interazione, della loro analisi funzionale nonché delle attrezzature e modalità di taratura e collaudo. Altri problemi oggetto di studio concernono la geometria del contatto ruota-rotaia e la conicità equivalente [50].

9.2.3. Sul versante opposto, ovvero dei contributi di autori singoli, va richiamato e sottolineato (Fig. 9) quello di Boocock [59], che chiaramente ispirato da CARTER, sviluppa un modello piano, quasi statico, di un veicolo a carrelli nel quale tutti i collegamenti sono di tipo elastico. Boocock fornisce inoltre una modellazione analitica, semplificata in 7 equazioni e altrettante incognite e le soluzioni algebriche. Il sistema può essere applicato alla marcia in rettilineo ed in curva.

9.2.4. Una ricerca ricca di successo fu condotta, in modo sostanzialmente autonomo, dalla FIAT Ferroviaria con il suo treno ad assetto controllato in curva. Nonostante la realizzazione di un elemento singolo e composto da 4 quattro pezzi, i positivi risultati della sperimentazione compiuta all'inizio degli anni settanta, la nuova soluzione dovette attendere il 1985 per la prima ordinazione FS. Ciò dipese in parte da incomprensioni tecniche sulla sfera d'impiego dei nuovi mezzi, sia da problematiche politiche che rischiavano di rimettere in discussione l'intero progetto dell'alta velocità. Alla guida del progetto furono il Prof. DI MAJO [44] e l'Ing. SANTANERA [63] per la FIAT, il Prof. CAMPOSANO per le FS ed il Prof. KOENIG dell'Università di Firenze.

9.2.5. Sul finire del secolo scorso fanno la loro comparsa i programmi di simulazione dei sistemi meccanici, che introducono una celerità inusitata nello studio e nella rappresentazione del problema. Nella maggior parte dei casi trattasi di programmi adattati da altre problematiche, ovvero come "Vampire" delle BR, costruiti ad hoc [41] e che prendono spunto analitico ([52], [53], [54], [55], [56], [57], [58]) dagli studi e dalla teoria di Mecanica Razionale sui sistemi multi-corpo (MBS), consolidati dagli Accademici dei Lincei.

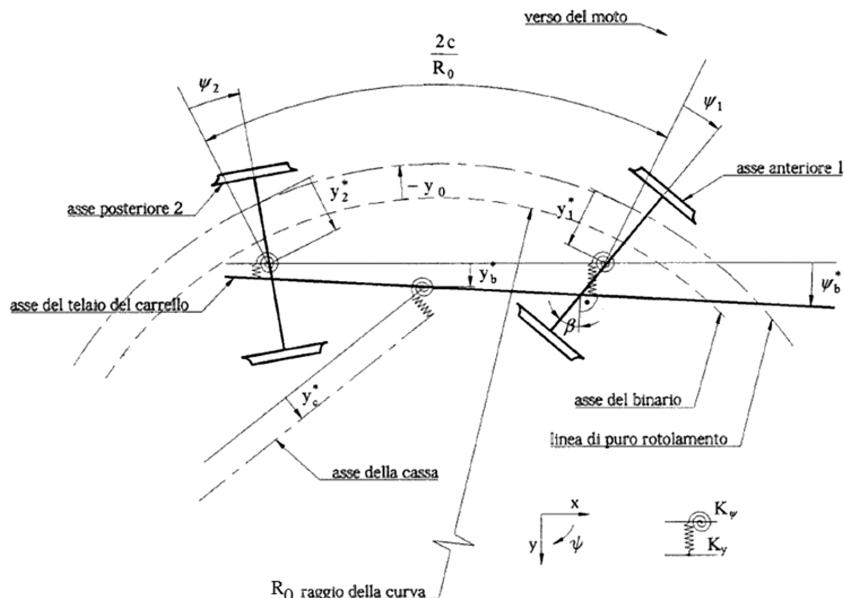
9.2.6. Gli studi ferroviari furono anche affiancati da programmi di ri-

with. Other problems under study concern wheel-rail contact geometry and equivalent conicity [50].

9.2.3. On the opposite side, that is the contributions of individual authors, Boocock's [59] should be recalled and emphasised (Fig. 9), who clearly inspired by CARTER, develops a level, almost static model of a vehicle with bogies in which all connections are elastic. Boocock also provides an analytical modelling, simplified in 7 equations and as many unknown and algebraic solutions. The system can be applied to operation on a straight and curved stretch.

9.2.4. FIAT Ferroviaria, conducted a successful research in a largely independent way, with its controlled train in a curve. Despite the creation of a single element composed of 4 four pieces, the positive results of the experimentation carried out at the beginning of the seventies, the new solution had to wait until 1985 for the first FS order. This partly stemmed from technical misunderstandings regarding the use of the new means, and from political controversies that threatened to call into question the whole high speed project. Prof. DI MAJO [44] and Eng. SANTANERA [63] for FIAT, Prof. CAMPOSANO for FS and Prof. KOENIG for the University of Florence led the project.

9.2.5. At the end of the last century the simulation programmes of the mechanical systems appear, which introduce an unusual speed in the study and representation of the problem. In most cases these are programmes adapted by other problems, or as "Vampires" of BR, built ad hoc



(Fonte: appunti Lezioni "Sistemi di Trazione II", A.A.2004-2005, "SAPIENZA" Università di Roma)
(Source: notes on "Traction Systems II" Lessons, A.Y.2004-2005, "SAPIENZA" University of Rome)

Fig. 9 - Lo schema semplificato del modello analitico di Boocock per un carrello con sale accoppiate elasticamente al telaio del carrello; la figura presenta una condizione di marcia in curva nella quale la spinta di bordino è nulla.

Fig. 9 - The Boocock simplified analytical model diagram for a bogie with elastically coupled wheel sets to the chassis of the bogie; the figure presents a travel condition in curve in which the flange thrust is zero.

cerca gestiti da altri enti, come in Italia i due progetti PFT 1 e 2 a cura del CNR o come il grande progetto del Ministero Tedesco per la Ricerca. Parte di questi progetti era da tempo orientata verso sistemi veloci non convenzionali. Nonostante gli ingenti investimenti economici, nessuno di essi ha superato la fase iniziale salvo il sistema giapponese a sostentazione magnetica, per il quale sarebbero da poco terminati gli esperimenti d'incrocio allo scoperto e in galleria alla velocità relativa di 1000 km/h.

10. La ristrutturazione dei sistemi ferroviari operata dalla CE

10.1. Sul finire del millennio una serie di Direttive della C.E. ha determinato una radicale trasformazione delle grandi reti di trasporto ferroviario e delle strutture ad esse connesse, delle quali si richiamano a seguire brevemente quelle capaci di incidere sulla ricerca.

In particolare va richiamata la scissione in gestori dell'infrastruttura (G.I.) ed imprese di ferroviarie (I.F.) di trasporto, tutti sotto forma di aziende private indipendenti. Alla scissione segue la nascita di grandi società d'ingegneria con compiti di progettazione di nuove linee e sistemi di ricerca orientati principalmente ai problemi operativi.

La globalizzazione del mercato ferroviario e la conseguente necessaria interoperabilità impone agli esistenti e nascenti operatori del settore, Gestori dell'Infrastruttura ed Imprese Ferroviarie, hanno imposto il potenziamento, quando non la creazione di nuove strutture a cui affidare la gestione della normativa di sicurezza ed il controllo della sua corretta applicazione.

10.2. A fronte di quanto accaduto nelle aziende ferroviarie, quelle industriali hanno seguito un processo inverso di concentrazione, sfociato nella nascita di pochissimi gruppi capaci di coprire tutto lo spettro di esigenze di un sistema ferroviario. La loro dimensione intercontinentale allontana il loro interesse verso prototipi fatti su misura per concentrarli sui pacchetti di soluzioni composti da molteplici moduli intercambiabili e quindi atti a soddisfare le esigenze più disparate.

10.3. A questo punto è necessario sottolineare i principali obiettivi verso cui si sta orientando la ricerca.

L'ampliamento delle conoscenze in fatto di sensoristica, sviluppatesi nel settore della sperimentazione, rende utile oltre che plausibile la concezione di sistemi di monitoraggio installati a bordo del treno, capaci di tenere sotto controllo la dinamica di marcia in un campo che va dal comfort alla sicurezza di marcia. In questo senso sono anche da vedere gli studi e le esperienze sull'impiego di treni merci di grande massa e relativi sistemi frenanti.

La strutturazione delle Autorità preposte ai controlli di sicurezza apre al via a studi sistematici sui grandi incidenti ferroviari. Studi ed esperienze riguardano i detetto-

[41] and that take an analytical basis ([52], [53], [54], [55], [56], [57], [58]) from the studies and the theory of Rational Mechanics on multi-body systems (MBS), consolidated by the Scholars of the Lincei.

9.2.6. Railway studies were also supported by research programmes managed by other bodies, as the two PFT 1 and 2 projects by the CNR in Italy or as the large project of the German Ministry for Research. Part of these projects had long been oriented towards fast, unconventional systems. Despite the huge economic investments, none of them passed the initial phase except for the Japanese magnetic support system, for which the open cross and in the tunnel experiments at a relative speed of 1000 km/h would have just ended.

10. Renovation of the railway systems operated by the European Commission

10.1. At the end of the Millennium, a number of E.C. Directives caused a radical transformation of the great railway transport networks and structures related to them, to which those capable of affecting research are briefly referred below.

In particular, the division in transport infrastructure managers (IMs) and railway undertakings (RUs) must be recalled, all in the form of independent private companies. The division is followed by the creation of large engineering companies with the task of designing new lines and research systems mainly oriented to operational issues.

The globalisation of the rail market and the consequent necessary interoperability imposed on existing and emerging operators, infrastructure managers and railway undertakings, imposed the enhancement, if not the creation of new facilities to entrust with the management of security rules and control of their correct application.

10.2. In the face of what happened in railway companies, industrial companies followed an inverse concentration process, resulting in the birth of very few groups able to cover the whole spectrum of needs of a railway system. Their intercontinental size makes them loose interest in prototypes tailored to focus on solution packages consisting of multiple interchangeable modules, and therefore suitable to satisfy the most diverse needs.

10.3. At this point it is appropriate to underline the main objectives towards which research is being directed.

The broadening of knowledge in sensors, developed in the field of experimentation, makes the design of monitoring systems installed on board the train useful, capable of keeping the driving dynamics under control in a field that ranges from comfort to safety of travel as well as plausible. In this sense the studies and experiences on the use of large mass freight trains and relative braking systems should also be seen.

The structuring of the Authorities responsible for security checks opens up to systematic studies on major railway

ri di svio per carri merci, circa i quali non sono mancati contrasti di opinione.

11. Conclusioni

11.1. Questa memoria dimostra la presenza e lo sviluppo di contenuti scientifici originali, per quanto nel settore considerato. Esso tuttavia raffigura un tassello di un quadro più generale delle conoscenze, che, in tutto o in parte, devono costituire e rappresentare il patrimonio culturale specialistico di riferimento di un ingegnere ferroviario.

11.2. Senza entrare per ora nel merito dei contenuti, si può cominciare a tratteggiare come il patrimonio in questione possa essere trasferito agli interessati, autodidatti compresi. È evidente come la lettura sistematica dei lavori richiamati non rappresenta una soluzione percorribile, per l'estensione e per l'accessibilità delle fonti.

11.3. Fortunatamente negli ultimi periodi vengono pubblicati trattati e manuali che risolvono sinteticamente il problema; in particolare, quelli più recenti, si rivolgono non a studenti bensì a professionisti, mantenendo al tempo stesso il massimo chiarezza. Una selezione di questi testi viene proposta in bibliografia ([43], [45], [46], [47], [49], [51]).

accidents. Studies and experiences concern the detectors of derailments for goods wagons, about which there were opinion contrasts.

11. Conclusions

11.1. This essay demonstrates the presence and development of original scientific content, for the considerations in the field in question. It however illustrates a piece of a bigger picture of knowledge, which, in whole or in part, must document and represent the reference specialist cultural heritage of a railway engineer.

11.2. Without going into the substance of the contents for the time being, we can begin to outline how the heritage in question can be transferred to interested parties, including self-taught people. It is evident that the systematic reading of the works referred to is not a viable solution, due to the extension and the accessibility of the sources.

11.3. Fortunately, in the last periods treatises and manuals are published that solve the problem synthetically; in particular, the most recent ones are not addressed to students but to professionals, while maintaining maximum clarity. A selection of these texts is proposed in the bibliography ([43], [45], [46], [47], [49], [51]).

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] M. BRUNER, G.R. CORAZZA, M.V. CORAZZA, "Divagazioni sull'ingegnere ferroviario. Osservazioni e proposte", Ingegneria Ferroviaria, luglio-agosto 2016, pagg. 603-813.
- [2] M. BRUNER, G.R. CORAZZA, E. COSCIOTTI, "Lo svio. Cento e più anni di ricerche su un problema complesso. Gli inizi e la scuola francese", Ingegneria Ferroviaria, CIFI, Dicembre 2009.
- [3] M. BRUNER, G.R. CORAZZA, E. COSCIOTTI, "Derailment. Over one hundred years of research on a complex problem. The german school", Ingegneria Ferroviaria, CIFI, Dicembre 2010.
- [4] M. BRUNER, G.R. CORAZZA, E. COSCIOTTI, "A hundred and more years of research on derailment. The Derailleurs", Ingegneria Ferroviaria, CIFI, Giugno 2012.
- [5] T. OLIVIER, "De la cause du déraillement des wagons sur les courbes des chemins de fer", Monografia di 92 pagg. Parigi 1846.
- [6] W. KLINGEL, "Ueber den Lauf der Eisenbahnwagen auf gerader Bahn", Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesen, aprile 1883.
- [7] L. POCHET, "Théorie du mouvement en courbe sur les chemins de fer", Editions Dunod Paris 1882.
- [8] M.J. NADAL, "Théorie de la stabilité des Locomotives", Annales des Mines 1896.
- [9] M.G. MARIÉ, "Etude complémentaire sur la stabilité du matériel ferroviaire. Théorie du déraillement et profile des bandages", Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils, Conferenza del 1909 pubblicata nel 1910.
- [10] M.G. MARIÉ, "Traité de stabilité du matériel des chemins de fer", Librairie Polytechnique Ch. Béranger, Parigi 1924, 580 pagg.
- [11] M. CHARTET, "La théorie statique du déraillement d'un essieu", Revue Générale des Chemins de Fer, parte I agosto 1950, parte II, settembre 1952.

SCIENZA E TECNICA

- [12] E. WINKLER, Annuali vari di Scienza e Tecnica delle Costruzioni.
- [13] H. UEBELACKER, "Untersuchungen ber die Bewegung von Lokomotiven mit Drehgestellen in Bahnkrummungen", Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens, Vol. 68, 1903, pagg. 1-25.
- [14] C.A. CARUS-WILSON, "Rail Corrugation", Engineering, 17 luglio 1908, pag. 90.
- [15] H. HEUMANN, "Zum verhalten Eisenbahnfahrzeugen in Gleisbogen", Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens, Vol. 6, 1913, pagg. 118-121 e pagg. 136-140.
- [16] H. HEUMANN, "Grundzüge der Spurführung", Elektrische Bahnen, numeri vari fra il 1952 ed il 1953.
- [17] M.P. LABRIJN, "Roue et Rail", Bulletin AICCF novembre 1950, pagg. 223-270 e gennaio 1951, pagg. 21-45.
- [18] F. MAUZIN, "Utilisation dans le chemins de fer des appareils piezo-electriques pour la mesure d'efforts", Revue Générale des Chemins de Fer, gennaio 1938, pagg. 2-33.
- [19] F. MAUZIN, "Les appareils à quartz piezoelectriques dans l'étude de la stabilité des véhicules de chemin de fer et d'autres utilisations ferroviaires", Revue Générale des Chemins de fer, maggio 1953, pagg. 253-273.
- [20] P.E. OLSON, S. JOHNSSON, "Seitenkräfte zwischen Rad und Schiene", Glasers Annalen, maggio 1959, pagg. 153-161.
- [21] E. SPERLING, A. POLAK, "Essais d'oscillation pour la détermination du rapport optimum entre la flexibilité entre d'esieu et de la traverse danseuse sur les bogies", Minden-Deutz, Bulletin Aiccf, ottobre 1957, pagg. 843-858 e anche su ETR, novembre 1956.
- [22] A. BONADERO, C. CASINI, G. TACCI, "Il fenomeno dello pseudoslittamento nella ripartizione delle coppie sui carrelli monomotorici ad aderenza della locomotiva dieselelettrica 445. Teoria e risultati sperimentali", Ingegneria Ferroviaria, dicembre 1979, pagg. 833-850.
- [23] H.H. VOGEL, "Zeichnerische Untersuchung der Bogenbeweglichkeit von Eisenbahnfahrzeugen", Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens, Anno 1926, pagg. 554-558 e tavole allegate, in lingua francese su Aide Memoir Dunod, 1954, Vol. I, pagg. 54-64.
- [24] K. SACHS, "Elektrische Triebfahzeuge", 2 Voll., 1953, editore Schweizerische Elektrotechnische Verein.
- [25] E. CZITARY, "Zur wellenformige Abnutzung der Schienen", ETR, giugno 1959, pagg. 247-258.
- [26] R. SAUVAGE, G. SARTORI, "Etude theorique de la dynamique transversale d'un bogie sur la voie", Revue Générale des Chemins de Fer, aprile 1977, pagg. 207-225.
- [27] C. CASINI, G. TACCI, "Studio di un modello matematico per la previsione della velocità critica su un binario senza difetti", Ingegneria Ferroviaria, marzo 1978, pagg. 262-275.
- [28] M. WEBER, "Prof. HEUMANN Arbeiten auf dem Gebiet der Spurführung im Zeichen der heutigen Rad/Schiene Technik", Glasers Annalen luglio-agosto 1978, pagg. 201-213.
- [29] A. BONADERO, "Metodi statistici e dinamica ferroviaria", Ingegneria Ferroviaria, novembre 1985, pagg. 721-741.
- [30] M. ZEILHOFER, G. SUSSMITH, G. von PIWENITZKI, "Ermittlung der Kräfte zwischen Rad und Schiene aus den Biegedehnun der Radsatzwelle", ZEV Rail Glasers Annalen, dicembre 1972, pagg. 373-385.
- [31] M. OSTERMEYER, H. BERG, H.H. ZUCK, "Entwickelung der Me method Radsatzwelleverfahren zur Bestimmung der Kräfte zwischen Rad und Schiene", ZEV Rail Glasers Annalen, febbraio 1972, pagg. 53-61.
- [32] H. BERG, G. GOBLING, H.H. ZUCK, "Radsatzwelle und Radscheub die richtige Kombination der zur Messung der Kräfte zwischen Rad und Schiene", ZEV Rail Glasers Annalen, febbraio 1995, pagg. 40-47.
- [33] ORE, Question C138, "Valeurs limites admissibles de Y et Q et criteres de deraillement", 10 Rapporti, 1977-1986.
- [34] ORE, Question C116, "Interaction entre Voie et Véhicule", 9 Rapporti, 1971-1981.
- [35] ORE, Question B10, "Mesure des forces agissantes entre la roue et le rail", Rapporto n.14, 1973.
- [36] G.R. CORAZZA, "Possibilité de mesure directe de la poussée du boudin", Rail International, pp. 30-36, 1985.
- [37] ORE, Question B176, "Drehgestelle mit radial einstellbaren Radsätzen", 1979-1985.
- [38] C. BIANCHI, G.R. CORAZZA, G. MALAVASI, "Problemi della ricerca sperimentale sulle interazioni fra ruota e rotaia", Ingegneria Ferroviaria, agosto 1986.
- [39] M. BRUNER, E. COSCIOTTI, R. LICCIARDELLO "On board measurement of contact forces", International Seminar on Railway axles, London Imperial College, 2003.

- [40] G.R. CORAZZA, R.V. LICCIARDELLO, G. MALAVASI, M. MARCONE, "La ruota quale sensore dell'interazione ruota–rotaia", Ingegneria Ferroviaria, marzo 1999, pagg. 119-131.
- [41] S. IWNICKI et alii, "Manchester benchmarking for rail vehicle simulation", Department of Mechanical Engineering of Manchester University, Suppl. Vol. 31 Journal of Vehicle Systems Dynamics, 2007.
- [42] A. BONADERO, "Riesame di problemi relativi a conicità equivalenti e velocità critiche con cerchioni usurati", Ingegneria Ferroviaria, settembre 2003, pagg. 769-790.
- [43] E. STAGNI, "Meccanica della locomozione", Edizioni Cedam, Padova 1956.
- [44] F. DI MAJO, "Costruzioni ferroviarie", Editore Levrotto e Bella, Torino.
- [45] R. PANAGIN, "Dinamica del veicolo ferroviario", CIFI Roma.
- [46] V.K. GARG, R.V. DUKKIPATI, "Dynamics of Railway Vehicle", Academic Press, New York, 1984.
- [47] C. ESVELD, "Modern railway track", Esveld, T.U. Delft, 2001.
- [48] J. ALIAS, "La voie", Eyrolles, Parigi.
- [49] H.L. KRUGMANN, "Lauf der schienenfahzeuge im Gleis. Eine Einführung", Oldenburg, Monaco di Baviera, 1982.
- [50] W. HANNEFORTH, W. FISCHER, "Drehgestelle", Tranveb Verlag, Berlino.
- [51] A.H. WICKENS "Fundamentals of rail Vehicle Dynamics. Guidance and Stability", Swets & Zeitlinger, Zurigo, 2003.
- [52] P. ARRUS, A.D. DE PATER, P. MEYERS, (2002), "The Stationary Motion of a One-Axle Vehicle Along a Circular Curve with Real Rail and Wheel Profiles", Vehicle System Dynamics, 37: 1, 29-58
- [53] A.D. DE PATER, (1988), "The geometrical contact between track and wheelset", Vehicle System Dynamics, 17, 127-140
- [54] A.D. DE PATER, "The equations of motion of single wheelset moving along a perfect track", Vehicle System Dynamics Vol. 17, Iss. sup1 (1988), 287 - 299
- [55] J.J. KALKER (1967), "On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction". Thesis. Department of Applied Mathematical Analysis, Delft University of Technology, The Netherlands.
- [56] J.J. KALKER, "Rolling Contact Phenomena: Linear Elasticity", TWA Reports, Department of Applied Mathematical Analysis, Delft University of Technology, The Netherlands
- [57] J.J. KALKER, J. PIOTROWSKI, (1989), "Some new results in rolling contact", Vehicle System Dynamics Vol. 18, 223-242.
- [58] J.J. KALKER, (1991), "Wheel-rail rolling contact theory", Wear, Vol. 144, 243-261
- [59] D. BOOCOCK, (1969), "Steady-state motion of railway vehicles on curved track", Vol. 11, n. 6, 556-566.
- [60] F.W. CARTER, (1916), "The electric locomotive", Proceedings Instn. Civ. Engrs. n.221, pp. 221-252.
- [61] G. ROBERT, (1939), "Osservazioni circa il metodo di Roy per lo studio della circolazione dei veicoli in curva", Rivista Tecnica delle Ferrovie Italiane, pag. 231-238
- [62] M. A. PRUD'HOMME (1974), "La Voie", RGCF, n.4 Aprile, pag. 56-72
- [63] M. BRUNER (2007), "Pensarono e progettarono il Pendolino", Ingegneria Ferroviaria n.11 Novembre, pag. 937-940.
- [64] M. A. PRUD'HOMME (1967), "La resistance della voie aux efforts transversaux exerces par le materiel roulant", RGCF n.1 Gennaio, pag. 1-23.