



Innovazione nella manutenzione di carrelli ferroviari mediante l'utilizzo di un sistema di pesatura portatile

Innovation in railway bogie maintenance using a portable weighing system

Nunzio BARBATI ^(*)
 Arturo BORRELLI ^(**)
 Donato CARILLO ^(***)
 Giovanni MANNARA ^(*)
 Giuseppe RACIOPPI ^(***)
 Salvatore STRANO ^(****)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.01.2023.ART.1.>)

Sommario - La distribuzione delle forze verticali trasmesse dalle ruote di un carrello al binario rappresenta un elemento di grande importanza ai fini della sicurezza di marcia e dell'economia di esercizio di un veicolo ferroviario. In condizioni statiche queste forze verticali possono ridursi alla sola forza peso.

L'importanza della conoscenza di tali forze è sottolineata anche dalla recente pubblicazione da parte del CEN delle norme EN 15654 che regolamentano propriamente la misura in condizioni statiche e dinamiche della distribuzione delle forze verticali di un veicolo ferroviario.

Nel presente articolo si vuole descrivere una soluzione di misura basata su un sistema completamente portatile a mano e di veloce utilizzo così da ridurre drasticamente costi e fermo di esercizio.

Queste caratteristiche aprono scenari manutentivi innovativi che riducono costi di manutenzione del carrello e offrono condizioni per l'incremento della sicurezza di esercizio di un veicolo ferroviario.

1. Introduzione

La misura della distribuzione della forza verticale scaricata sulla rotaia dalla singola ruota di un veicolo ferroviario, che in condizioni statiche rappresenta la sola forza peso, è sempre stata di grande interesse per valutare l'influenza sulla dinamica di marcia e quindi sia sulle condizioni di sicurezza e sia sulle condizioni che determinano l'usura della ruota stessa e dell'armamento.

Riguardo questa distribuzione nell'ambito di un carrello, si definiscono sia uno sbilanciamento laterale di ciascu-

Summary - The distribution of the vertical forces exerted by the wheels on a track is a very important parameter for the safe running and operating economy of a railway vehicle. Under static conditions, these vertical forces can be reduced to the weight force only. The importance of knowledge of these forces is also underlined by the recent publication by the CEN of the EN 15654 standards, which specifically regulate the measurement under static and dynamic conditions of the distribution of vertical forces in a rail vehicle. In this article, we would like to describe a measurement solution based on a completely hand-portable system that is quick to use and thus drastically reduces costs and downtime. These features open up innovative maintenance scenarios that reduce bogie maintenance costs and offer conditions for increasing the operational safety of a railway vehicle.

1. Introduction

The measure of the distribution of the vertical force exerted onto the rail by each wheel of a railway vehicle under static conditions represents the weight force only. This distribution has always been of great interest for assessing the influence on the running dynamics and on the safety conditions and the conditions that determine the wear of the wheel itself and the railway track infrastructure.

Regarding this distribution within a bogie, both relative wheel force deviation per wheelset $(Q_{right}-Q_{left})/(Q_{right}+Q_{left})$ and the wheelset force deviation (front-rear) inside running gear $(Q_{front}-Q_{rear})/(Q_{front}+Q_{rear})$ are defined.

^(*) IVM S.r.l..

^(**) EAV S.r.l..

^(***) Dirigente FS a riposo.

^(****) Università di Napoli Federico II.

^(*) IVM S.r.l..

^(**) EAV S.r.l..

^(***) Retired FS Executive.

^(****) Università di Napoli Federico II.

na sala $\Delta Q/(Q_{dx}+Q_{sx})$ e sia uno sbilanciamento anteriore-posteriore fra le due sale $(Q_{ant}-Q_{post})/(Q_{ant}+Q_{post})$.

Le norme europee di interoperabilità (STI LOC&PAS) e le corrispondenti norme nazionali impongono il rispetto di limiti sempre più stringenti nella distribuzione della forza verticale e nello sbilanciamento degli assi, che devono essere rispettati sia durante il processo di omologazione di nuovi rotabili e sia durante l'esercizio. Quest'ultimo punto impone piani di manutenzione che siano in grado di assicurare il mantenimento di queste caratteristiche. A questo scopo, si cominciano ad introdurre anche logiche manutentive *on condition* nell'ambito degli intervalli previsti dalle manutenzioni cicliche.

L'importanza di queste misure è rafforzata dalla recente emanazione delle norme EN 15654 tutte dedicate alla determinazione della forza verticale scaricata dalle ruote sulle rotaie in condizioni statiche e dinamiche.

L'articolo nasce a seguito del webinar CIFI dell'Aprile 2021, organizzato dalla Sezione di Napoli. Nei paragrafi successivi viene presentata l'architettura delle norme più recenti riguardanti la necessità di misura della distribuzione della forza verticale sulle ruote e il processo che è stato seguito per certificare la conformità del sistema di misura portatile denominato POWERVE® alla norma EN 15654-2.

Nella parte finale dell'articolo è sintetizzato un progetto, iniziato in EAV con la collaborazione dell'Università di Napoli Federico II, per l'introduzione della misura di distribuzione del peso durante la manutenzione di primo livello finalizzata sia al rispetto dei vincoli della STI LOC&PAS e sia ad ottenere una maggiore efficienza nella manutenzione del parco rotabili.

2. Contesto normativo

Negli ultimi 10-15 anni, sulla spinta dei processi di interoperabilità ferroviaria e di armonizzazione delle differenti normative a livello comunitario, anche nell'ambito della problematica della pesatura si è avuto un importante sviluppo di norme e prescrizioni, tutt'ora in fase di recezione dai vari organismi. Come punto di partenza della definizione del quadro normativo si può considerare la direttiva 2008/57/CE del 17 giugno 2008 relativa all'Interoperabilità del sistema ferroviario comunitario. La direttiva definisce "Interoperabilità" la capacità dei sistemi ferroviari di consentire la circolazione sicura e senza soluzione di continuità dei treni su di una rete infrastrutturale adeguata, garantendo il livello di prestazioni richiesto per le linee; tale capacità si fonda sull'osservanza di un insieme di prescrizioni regolamentari e tecniche, operative e di sicurezza.

Ne consegue che per attuare e realizzare l'interoperabilità c'è bisogno di creare ed elaborare norme armonizzate ed individuare standard tali da permettere una omogeneizzazione della rete e dei servizi ferroviari offerti da gestori delle infrastrutture e dagli operatori del settore. A questo scopo vengono emesse le "Specifiche Tecniche Di Interoperabilità" (S.T.I. o T.S.I.) ossia l'insieme condiviso

The European standards of Technical Specification for Interoperability (TSI LOC&PAS) and the corresponding national standards impose increasingly attention to the stringent limits on vertical force distribution and wheelset imbalance, which must be respected both during the approval process for new rolling stock and during operation. The latter point imposes maintenance plans that are able to ensure that these characteristics are maintained. To this aim, on-condition maintenance logics have to be introduced between the cyclical maintenance intervals.

The importance of these measures is reinforced by the recent issue of the EN 15654 standards, which regulates the measurements of vertical forces on wheels under static and dynamic conditions. This article is the result of the CIFI webinar in April 2021, organised by the Naples Section. The following paragraphs present the architecture of the most recent standards concerning the need to measure the distribution of vertical forces on wheels and the process that has been followed to certify the conformity of the portable measuring system called POWERVE® to the EN 15654-2 standard.

The final part of the article summarises a project, started at EAV (Ente Autonomo Volturno) with the collaboration of the University of Naples Federico II. The project introduces the measurement of wheel load distribution during first-level maintenance aimed at both complying with the requirements of the LOC&PAS TSI and obtaining greater efficiency in the maintenance of the rolling stock (s).

2. Regulatory context

In the last 10-15 years an important development of standards and prescriptions takes place, driven by the process of railway interoperability and harmonisation of the different regulations in the EU. These standards are still being implemented by various bodies. As a starting point for the definition of the regulatory framework, it can be considered Directive 2008/57/EC of 17 June 2008 on interoperability of the rail system within the Community. This Directive defines "Interoperability" as the ability of a rail system to allow the safe and uninterrupted movement of trains which accomplish the required levels of performance for these lines. The ability depends on all the regulatory, technical and operational conditions which must be met in order to satisfy the essential requirements. It follows that, to implement and realise interoperability, there is a need to create and draw up harmonised rules and identify standards to enable the homogenisation of the network and the railway services offered by infrastructure managers and operators. To this end, "Technical Specifications For Interoperability" (T.S.I.) are issued, i.e., the shared set of technical measures and management rules to be implemented in the railway system. On the legal basis of the aforementioned Directive 57/2008 comes Commission Decision 2010/713 of 9 November 2010

On modules for the procedures for assessment of conformity, suitability for use and EC verification to be used in the technical specifications for interoperability adopted

delle misure tecniche e delle regole di gestione, da implementare nel sistema ferroviario.

Sulla base giuridica della citata Direttiva 57/2008 nasce la decisione 2010/713 della Commissione del 9 novembre 2010 concernente i moduli per le procedure di valutazione della conformità, dell'idoneità all'impiego e della verifica CE da utilizzare per le specifiche tecniche di interoperabilità adottate nell'ambito della direttiva 2008/57/CE del Parlamento europeo e del Consiglio. Tale decisione, per natura vincolante e direttamente applicabile ai Paesi destinatari, sorge per un'esigenza specifica: per tener conto delle caratteristiche peculiari del sistema ferroviario, è opportuno predisporre dei moduli specifici per questo settore, al fine di garantire la coerenza tra tutti gli atti legislativi concernenti i componenti di interoperabilità e dei sottosistemi. Per stabilire un insieme comune di moduli per tutte le STI, è necessario introdurli in un unico atto legislativo. La suddetta decisione fornisce perciò, un insieme comune di moduli che dovrebbe consentire al legislatore di scegliere le procedure adeguate alla valutazione della conformità e dell'idoneità all'impiego e alla verifica CE al momento dell'elaborazione o della revisione delle STI. Pertanto le STI sono rivolte, in definitiva, a conseguire gli obiettivi e soddisfare i requisiti essenziali sia della direttiva 2008/57/CE sia delle successive direttive (UE) 2016/797 e 798. Tappa fondamentale è la pubblicazione nelle S.T.I. del regolamento UE N°1302/2014 (noto come STI LOC & PAS) [1] nato appunto dal mandato dell'Agenzia ferroviaria europea, (ERA), di estendere le STI (specifiche tecniche di interoperabilità) all'intero sistema ferroviario dell'Unione. Analoghe disposizioni sono relative anche al Regolamento UE N°321/2013 della Commissione del 16 maggio 2019 nota anche come STI WAG, e successive [2][3]. Durante gli anni, la STI 1302/2014 è stata modificata da diversi regolamenti esecutivi in alcune sue parti e in seguito ufficializzati sulla Gazzetta Ufficiale rilasciando delle nuove versioni della STI (ultimo aggiornamento Marzo 2020). A livello nazionale le direttive sono state recepite tramite vari decreti emessi dall'agenzia ANSFISA che definiscono le regole nazionali per la messa in servizio dei veicoli sulla rete italiana "Norme tecniche nazionali in materia di sottosistemi costituenti i veicoli ferroviari relative alla autorizzazione di messa in servizio dei veicoli". Per quanto riguarda la tematica della rilevazione del carico per asse e per ruota, oltre al rispetto delle prescrizioni delle varie STI, nei decreti attuativi emanati dall'Agenzia per la sicurezza si cita la CEI EN 50215 [4] tra i codici di buona pratica. Questa norma ha come oggetto i processi di collaudo del materiale rotabile, dopo ultimato assemblaggio e prima della messa in servizio. In particolare, le prove di pesatura (paragrafo § 8.5) dei rotabili da collaudare sono rivolte alla verifica che la massa complessiva e la distribuzione dei pesi sia compatibile con quanto atteso da progetto.

Inoltre, la STI LOC&PAS, come metodo di verifica della conformità ai requisiti di "sicurezza contro il deragliamento durante la circolazione su sghembi di binario" specifica di seguire i paragrafi 4,5,6.1 della EN 14363. Per i requisiti inerenti alla dinamica di marcia, i metodi di va-

under Directive 2008/57/EC of the European Parliament and of the Council.

This decision, which is binding and directly applicable to the Member States, arises from a specific need: to take into account the specific characteristics of the railway field, specific modules should be drawn up to ensure consistency between all legislative acts concerning interoperability components and subsystems. In order to establish a common set of modules for all TSIs, it is necessary to introduce them in a single legislative act. Therefore, the above-mentioned decision provides a common set of modules that should enable the legislator to choose the appropriate procedures for assessing conformity and suitability for use and EC verification when drafting or revising TSIs. Therefore, the TSIs are ultimately aimed at achieving the objectives and meeting the essential requirements of both Directive 2008/57/EC and the subsequent Directives (EU) 2016/797 and 798. A milestone is the publication in the TSIs of EU Regulation N° 1302/2014 (known as LOC & PAS TSI) [1] born precisely from the mandate of the European Railway Agency (ERA), to extend the TSIs (Technical Specifications for Interoperability) to the entire railway system of the European Union. Similar provisions are also related to the EU Commission Regulation N°321/2013 of 16 May 2019 also known as the WAG TSI, and subsequent ones [2][3]. Throughout the years, TSI 1302/2014 has been amended by several executive regulations in some of its parts and subsequently published officially in the Official Journal by issuing new versions of the TSI (last update March 2020). At national level, the directives have been transposed by means of various decrees issued by the ANSFISA agency defining the national rules for placing vehicles in service on the Italian network: "National technical standards for subsystems constituting railway vehicles relating to authorisation for placing vehicles in service".

With regard to the measurement of the wheelset and wheel load, the implemented decrees issued by the Safety Agency mention, in the codes of good practice also the CEI EN 50215 [4], in addition to the requirements imposed by the LOC&PAS and CCS TSI. This standard deals with the rolling stock tests to be performed after the final assembly and before commissioning. In particular, the weighing tests (paragraph § 8.5) of the rolling stock to be tested are aimed at verifying that the overall mass and weight distribution are compatible with the design expectations.

Furthermore, the LOC&PAS TSI specifies to follow paragraphs 4,5,6.1 of EN 14363 as a method of verifying compliance with the requirements of "safety against derailment running on twisted track" For requirements relating to "running dynamic behaviour", the conformity assessment methods are set out in paragraphs 4,5,7 of EN 14363. The European Standard EN 14363 defines the process for evaluating the running characteristics of railway vehicles for the European network on standard gauge tracks.

In addition to the evaluation of vehicle running characteristics for acceptance processes, EN 14363 also defines quantities and relationships that are not directly used for

lutazione della conformità sono indicati ai paragrafi 4,5,7 della EN 14363.

La Norma Europea EN 14363 definisce il processo per la valutazione delle caratteristiche di marcia dei veicoli ferroviari per la rete europea su binari a scartamento normalizzato.

La EN 14363, oltre alla valutazione delle caratteristiche di marcia dei veicoli per i processi di accettazione, definisce anche quantità e relazioni che non sono usate direttamente per scopi di accettazione¹. Nell'ambito dei numerosi test previsti, destinati essenzialmente alla misura di livelli di accelerazione e delle forze di contatto all'interfaccia tra ruota e rotaia, è anche richiesta specificatamente la misura del carico per asse in condizioni statiche. In particolare, all'interno della EN 14363 [5][6] in riferimento alla distribuzione del carico statico per ruota, al paragrafo § 5.3.3, si specifica di seguire la EN 15654-2 relativa alla distribuzione delle forze statiche sulle ruote [7]. Quest'ultima norma, dopo alcuni anni in cui è stata presentata in modalità bozza, è stata pubblicata nella sua versione definitiva nel 2019 ed è destinata a prendere il posto della EN 50215 nelle prove di pesatura. Quando si configura l'operazione di pesare un treno, il parametro fisico di interesse ai fini di sicurezza, manutenzione e circolazione, come inteso dalla norma EN 15654-2, è a tutti gli effetti la misura del carico scaricato verticalmente dalle ruote sulle rotaie.

Questo serve soprattutto per determinare e ridurre eventuali squilibri dei carrelli così da migliorare la dinamica di marcia ai fini di aumentare la sicurezza e ridurre l'usura delle ruote e del binario.

Pertanto, è di particolare importanza, oltre al come pesare che è ben descritto dalla norma citata, anche il quando pesare su cui, in verità, non esistono delle prescrizioni univoche, sebbene quest'operazione appare certamente necessaria in riferimento a due situazioni:

- nell'ambito dell'omologazione di nuovi rotabili. Infatti (in riferimento sempre alle STI) sono indicate una serie di prove da compiere, tra cui la distribuzione del peso:
 - a. su un veicolo campione "tipo" (o se disponibili su un numero più ampio di campioni, 5, su cui effettuare la media);
 - b. su ogni veicolo della serie prodotta, la massa totale del veicolo pesata nella condizione di carico «massa di progetto in ordine di marcia» non deve essere superiore di oltre il 3% [4] rispetto alla massa totale del veicolo dichiarata per tale tipologia.
- alla messa in servizio di rotabili a seguito di una manutenzione straordinaria che abbia portato a modifiche impattanti sulla variazione di massa come suggerito dalla EN 14363 e dalle STI.

Il passaggio successivo per una completa attività di pe-

acceptance purposes¹. Within the scope of the numerous tests provided, which are essentially intended for the measurement of acceleration levels and contact forces at the interface between wheel and rail, the measurement of wheel-set load under static conditions is also specifically required. In particular, for what regards the distribution of static wheel load, §5.3.3 of EN 14363 [5][6] specifies to follow EN 15654-2 [7]. The latter standard, after several years in which it was presented in draft mode, was published in its final version in 2019 and is intended to take the place of EN 50215 in weighing tests. When configuring the operation of weighing a rolling stock, the physical parameter of interest for safety, maintenance and traffic, as stated by EN 15654-2, is the measurement of the vertical force exerted by each wheel on the rail. This measurement is above all aimed to determine and reduce any bogie imbalances in order to improve running dynamics for increasing safety and reducing wheel and rail wear.

Therefore, in addition to how to weigh, which is well described in the above-mentioned standard, it is also of particular importance when to weigh, on which there are no unambiguous prescriptions, although this operation certainly appears necessary with reference to two situations:

- *the approval phase of new rolling stock. In fact (again concerning the TSIs) a series of tests to be carried out are indicated, including weight distribution:*
 - a. *on a "type" sample vehicle (or if available on a larger number of samples, 5, on which to average);*
 - b. *on each vehicle in the series produced, the total mass of the vehicle weighed in the «design mass in working order» loading condition shall not exceed the total mass of the vehicle declared for that type by more than 3%.*
- *the commissioning of rolling stock following extraordinary maintenance (or after modifications) that has led to modifications affecting the change in mass as suggested by EN 14363 and the TSIs.*

The next step for a complete weighing activity is to evaluate the prescriptions and the definition of the operational limits of the weight distribution; for this subject, in addition to the indications imposed by the manufacturer or the client, as well as indications and parameters proposed by 15654-2 itself, specific indications can be found:

- *in the already mentioned LOC&PAS TSI updated to 2020, where wheel load difference limit of 5% of the axle load is considered for the safety of rolling stocks (similar reasoning is also given in the ANSFISA guidelines);*
- *in the technical standard EN 15528 [8], which provides indications and tolerances regarding axle load and wheel load according to the type of vehicle and the railway line category. In particular, with reference to § 6, there are also specific indications that regard the load ratio of the two wheels of a wheelset of freight wagon.*

¹ Attualmente la EN 14363:2016 nella versione 2018 è stata recepita a livello nazionale nella UNI EN 14363:2019 (pur rimanendo in lingua inglese) [5].

¹ Currently, the 2018 version of EN 14363:2016 has been nationally transposed into EN 14363:2019 (while remaining in English) [5].

satura consiste nel valutare le prescrizioni e la definizione dei limiti operativi delle pesature; per questo argomento, oltre le indicazioni imposte dal costruttore o dal committente, nonché indicazione e parametri proposti dalla stessa 15654-2, si possono trovare indicazioni specifiche:

- nella già citata STI LOC&PAS aggiornata al 2020, dove si considera per la sicurezza un limite dello sbilanciamento laterale del 5% del carico per asse per la circolazione del materiale rotabile (analogo ragionamento è riportato anche nelle linee guida ANSFISA);
- nella norma tecnica EN 15528 [8] che fornisce indicazioni e tolleranze in merito al carico per asse e per ruota in base alla tipologia di veicolo e di sede ferroviaria ospitante. In particolare, con riferimento al § 6, sono presenti anche indicazioni specifiche sui carri che considerano il rapporto del carico delle due ruote di una sala montata.

Si aggiunge a queste prescrizioni che:

- a) un valore dello sbilanciamento laterale superiore al 5% del carico per asse per tali sale montate è consentito solo se dimostrato accettabile dalla prova per la dimostrazione della sicurezza contro il deragliamento su sghembi specificata al punto 4.2.3.4.1 della STI LOC&PAS;
- b) nelle indagini post incidenti si ritrova spesso la verifica dello sbilanciamento dei carrelli [9].

3. Il sistema POWERVE®

La necessità di sviluppare un sistema portatile per la misura della distribuzione della forza peso di un rotabile sul binario, nasce alcuni anni fa su sollecitazione dell'Unità responsabile della gestione del materiale rotabile di RFI.

L'obiettivo era di verificare con maggiore frequenza che la flotta di RFI fosse costituita da rotabili sempre bilanciati e in linea con quanto prescritto dal regolamento UE N°1302/2014 (noto come STI LOC & PAS) [1].

La necessità di perseguire questo obiettivo derivava da motivi sia di sicurezza nell'esercizio e sia di riduzione dell'usura delle rotaie.

Le modalità di misura più utilizzate a quel tempo erano essenzialmente:

- portare il rotabile su un sito attrezzato con una bilancia fissa;
- sollevare il rotabile così da interporre delle adeguate celle di carico in grado di effettuare la misura.

La prima modalità presentava il problema di dover portare il rotabile su una pesa fissa con evidenti oneri di tempi e di costi spesso elevati. Per questo la caratteristica di portabilità dello strumento di misura veniva richiesta proprio per evitare lo spostamento del rotabile così da ridurre i tempi ed i costi.

Il secondo metodo, basato sul sollevare il rotabile, presentava diversi problemi:

It is added to these prescriptions that:

- a) *wheel load difference higher than 5% of the axle load for that wheelset is allowed only if demonstrated as acceptable by the test to prove safety against derailment on twisted track specified in clause 4.2.3.4.1 of this TSI.*
- b) *verification of bogie imbalance is frequently found in post-accident investigations [9].*

3. The POWERVE® system

The need to develop a portable system for measuring the load distribution of rolling stock on the track arose a few years ago from the request of the RFI's Department. The aim was to check more frequently that RFI's fleet consisted of rolling stocks that were always balanced and compliant with the requirements of EU Regulation N°1302/2014 (known as the LOC & PAS TSI) [1].

The need to pursue this objective stemmed from reasons of both safety in operation and the reduction of rail wear. The most common measurement modes at that time were, essentially:

- *bringing the rolling stock to a site equipped with a fixed scale;*
- *lifting the rolling stock so that suitable load cells could be placed in between to perform the measurement.*

The first method presented the problem of having to bring the rolling stock to a fixed scale with obvious time and cost burdens that were often high. For this reason, the portability of the measuring instrument was required precisely to avoid moving the rolling stock in order to reduce time and costs. The second method, based on lifting the rolling stock, presented several problems:

- *the load cells were interposed at the axle box of each wheel, significantly altering the attitude of the rolling stock compared to the normal support on the running surface;*
- *external forces had to be applied during measurement to ensure the stability of the stationary rolling stock on the cells and these forces could alter the measurement;*
- *the coupling between the rolling stock and the load cells and their positioning on the ground was always uncertain, causing poor measurement repeatability;*
- *the system used could be considered transportable, but not portable (mainly due to the Lifting jacks) and with an excessively long installation and measurement time.*

The objective of the measurement was to obtain information on the distribution of the weight force on the four wheels of a bogie in order to limit the relative wheel force deviation per wheelset $(Q_{right}-Q_{left})/(Q_{right}+Q_{left})$ below 5%, as prescribed by the LOC & PAS TSI. To be able to appreciate this imbalance, the system had to be able to measure with a very low error per wheel, i.e. below 1%. This was very different from the results that could be obtained by lifting the rolling stock and in some cases could not even be

- le celle di carico venivano interposte in corrispondenza della boccola di ciascuna ruota modificando significativamente l'assetto del rotabile rispetto al normale appoggio sul circolo di rotolamento;
- durante la misura era necessario applicare forze esterne per garantire la stabilità del rotabile fermo sulle celle e queste forze potevano alterare la misura;
- l'accoppiamento fra il rotabile e le celle di carico e il loro posizionamento al suolo era sempre incerto causando una scarsa ripetibilità della misura;
- il sistema impiegato poteva essere considerato trasportabile, ma non portatile (soprattutto a causa dei sollevatori) e con un tempo di installazione e di esecuzione della misura eccessivamente lungo.

L'obiettivo della misura era di ottenere informazioni sulla distribuzione della forza peso sulle quattro ruote di un carrello così da limitare eventuali sbilanciamenti ruota dx-ruota sx per una sala montata al di sotto del 5%, così come prescritto dalla *STI LOC & PAS*.

Per poter apprezzare questo sbilanciamento, il sistema doveva essere in grado di misurare con un errore per singola ruota molto basso ovvero al di sotto dell'1%.

Questo era ben lontano dai risultati ottenibili con il sollevamento del rotabile ed in alcuni casi non ottenibile neanche con alcune pesi fisse.

Il sistema che si andava progettando doveva quindi rispettare alcune condizioni:

- misurare in corrispondenza del normale punto di contatto ruota-rotaia;
- non alterare minimamente l'assetto del rotabile e delle sue sospensioni;
- non aver bisogno di applicare alcuna forza esterna durante la misura così da scaricare attraverso le ruote la sola forza peso;
- avere un errore complessivo in campo per singola ruota $< 1\%$;
- essere portatile a mano da due operatori;
- essere impiegabile su un normale binario di un piazzale ferroviario.

Nasce quindi l'idea di utilizzare delle rampe (Fig. 1) da adagiare sul binario davanti a ciascuna ruota di un carrello. Movimentando il rotabile con un mezzo di manovra così da far avanzare il carrello si ha che ciascuna ruota durante il rotolamento realizza anche una traslazione verticale fino alla zona di misura nella quale sono presenti gli elementi sensibili alla forza peso. Ciascuna rampa è costituita da tre zone: il tratto in salita, il tratto orizzontale di misura ed un tratto finalizzato a proteggere il sistema da ulteriori avanzamenti della ruota.

Il sistema prevede la misura del singolo carrello o la misura contemporanea fino a tre carrelli.

obtained with some fixed scales. The system being designed therefore had to meet certain requirements:

- *to measure at the wheel-rail contact point;*
- *not to alter in any way the manner in which the rolling stock lies on the track in its normal condition and its suspension;*
- *not need to apply any external force during measurement to exert through the wheels the weight force only;*
- *an overall error in the field per wheel of $< 1\%$;*
- *portable system by two operators;*
- *be usable on any kind of railway track.*

This led to the idea of using ramps (Fig. 1) to be placed on the track in front of each wheel of a bogie. If we move the rolling stock with a shunting machine to let the bogie goes on, each wheel as it rolls also performs a vertical movement up to the measuring zone in which the sensing elements are located. Each ramp is made up of three zones: the uphill section, the horizontal measuring section and a section designed to protect the system from further wheel movements. The system allows the measurement of a single bogie or the simultaneous measurement of up to 6 wheelsets.

This idea made it possible to solve all the points listed above provided that:

- *the sensing element was very low so as to limit the slope on the ramps;*
- *the sensing element was sufficiently accurate (error $< 1\%$) so that a field error of less than 1% could be achieved.*

For this purpose, a load cell (Fig. 2) with small dimensions (height 40mm) and excellent metrological characteristics was designed and produced. This made it possible to:

- *obtain a ramp slope of 4%;*
- *place the load cells directly on the rail;*
- *use a pair of load cells for each wheel.*

In this way, the ramp gradient is comparable to the maximum permissible gradient for an ordinary railway line.



Figura 1 – Rampa di salita.
Figure 1 – Positioning ramp.



Figura 2 – Cella di carico.
Figure 2 – Load cell.

Questa idea ha permesso di risolvere tutti i punti precedentemente elencati a patto che:

- l'elemento sensibile fosse molto basso così da limitare la pendenza sulle rampe;
- l'elemento sensibile fosse sufficientemente preciso (errore $<<1\%$) così da poter ottenere un errore in campo inferiore all'1%.

Allo scopo è stata realizzata una cella di carico (Fig. 2) di dimensioni contenute (altezza 40mm) e con caratteristiche metrologiche eccellenti. Questo ha permesso di:

- ottenere un rateo di salita della rampa del 4%;
- poggiare le celle di carico direttamente sulla rotaia;
- utilizzare una coppia di celle di carico per ciascuna ruota.

In questo modo la pendenza di salita sulla rampa è paragonabile alla massima pendenza ammissibile per una linea ferroviaria ordinaria.

Inoltre l'utilizzo di una coppia di celle favorisce un "effetto culla" per la ruota (Fig. 3) in grado di rendere stabile la posizione del rotabile sulla zona di misura così che non sia necessario applicare nessuna forza esterna.

Una particolare cura è stata poi impiegata per fare in modo che le caratteristiche metrologiche delle celle di carico non venissero ridotte eccessivamente dalle condizioni di campo.

Allo scopo è stata condotta una significativa attività di sviluppo finalizzata ad individuare i fattori del campo che maggiormente possono avere influenza sulla misura.

Questi fattori possono essere sintetizzati in:

- modalità di appoggio del carico (e quindi della ruota) sulla cella;
- modalità di appoggio della cella di carico sulla rotaia;
- posizionamento trasversale del carrello.

In addition, the use of a pair of cells creates a 'cradle effect' for the wheel (Fig. 3) that stabilises the position of the rolling stock on the measurement area so that no external force needs to be applied.

Special care was then taken to ensure that the metrological characteristics of the load cells were not unduly reduced by field conditions. To this end, a significant amount of development activities was carried out to identify the factors in the field that can have the greatest influence on the measurement.

These factors can be summarised as:

- *how the load (and therefore the wheel) rests on the cell;*
- *how the load cell rests on the rail;*
- *transversal positioning of the bogie.*

Numerous expedients have been adopted in manufacturing technology for the first two points, to minimise negative effects. For the third point, it was ensured that the wheel contact point with the load cell remained aligned with the contact line that the wheel follows as it rolls on the rail. In this way, the measurement takes place in a condition practically identical to the set-up that the rolling stock assumes while running.



Figura 3 – Posizione di misura.
Figure 3 – Measuring position.

Per i primi due punti sono stati adottati numerosi accorgimenti nella tecnologia di fabbricazione che hanno permesso di ridurre al minimo gli effetti negativi.

Per il terzo punto si è fatto in modo che il punto di contatto della ruota con la cella di carico rimanesse allineato alla linea di contatto che la ruota segue durante il suo rotolamento sulla rotaia. In questo modo la misura avviene in una condizione praticamente identica all'assetto che il rotabile assume durante la marcia.

Occorre anche sottolineare che il posizionamento trasversale del rotabile è normalmente variabile durante la sua marcia e conseguentemente, anche se non cambia il peso totale che i carrelli scaricano sul binario, può cambiare la distribuzione del peso sulle ruote.

Il risultato, di cui si parlerà in dettaglio al paragrafo successivo quando verrà illustrato il processo di certificazione, può essere riassunto in:

It should also be emphasised that the transversal positioning of the rolling stock is normally variable during its travel, and consequently, even if the total weight that the bogies unload on the track does not change, the distribution of the weight on the wheels can change.

The result, which will be discussed in detail in the next section when the certification process is explained, can be summarised as:

As can be seen from Tab. 1, the measurement error on the individual wheel in the field is about an order of magnitude greater than with laboratory calibrations. This is why it was particularly important to perform field tests during the certification process to EN 15654-2 (see next paragraph) in order to ascertain the actual metrological performance resulting not only in the laboratory tests, but also in the field operating conditions.

In addition to ramps and load cells, the POWERVE® system consists of:

Tabella 1 – Table 1

Prestazioni celle di carico
Load cell performance

Cella di carico (utilizzo singola in condizioni di laboratorio) <i>Load cell (single use under laboratory conditions)</i>				
Norma di riferimento <i>Standard of reference</i>	Classe di precisione <i>Accuracy class</i>	Risoluzione (t) <i>Resolution (t)</i>	Accuratezza (%) <i>Accuracy (%)</i>	Mobilità-minimo delta forza misurabile- (t) <i>Mobility-minimum delta measurable force- (t)</i>
ISO 376 ²	1	0.005	0.05	0.1
Cella di carico (utilizzo in coppia in condizioni di laboratorio) <i>Load cell (single use under laboratory conditions)</i>				
Norma di riferimento <i>Standard of reference</i>	Classe di precisione <i>Accuracy class</i>	Risoluzione (t) <i>Resolution (t)</i>	Accuratezza (%) <i>Accuracy (%)</i>	Mobilità-minimo delta forza misurabile- (t) <i>Mobility-minimum delta measurable force- (t)</i>
ISO 7500-1 ³	0.5	0.01	0.2	0.1
Cella di carico (utilizzo in coppia in condizioni di campo) <i>Load cell (couple use under laboratory conditions)</i>				
Norma di riferimento <i>Standard of reference</i>	Classe di precisione <i>Accuracy class</i>	Risoluzione (t) <i>Resolution (t)</i>	Accuratezza (%) <i>Accuracy (%)</i>	Mobilità-minimo delta forza misurabile- (t) <i>Mobility-minimum delta measurable force- (t)</i>
ISO 7500-1(EN 15654-2) ⁴	0.5	0.01	0.5	0.2

² Specifica prova per la taratura delle celle di carico svolta presso laboratorio Accredia.

³ Si prende come riferimento la norma ISO 7500-1 nelle modalità suggerite dalla EN 15654-2 nel paragrafo relativo alla conferma metrologica; le relative prove, pur non essendo normate, sono state comunque svolte presso un laboratorio Accreditato.

⁴ Si prende come riferimento la norma ISO 7500-1 nelle modalità suggerite dalla EN 15654-2 nel paragrafo relativo alla conferma metrologica; queste prove sono state svolte mediante confronto un riferimento fisso certificato e sotto sorveglianza dell'ente certificatore ITALCERTIFER.

² Specific test for load cell calibration performed at Accredia laboratory.

³ The ISO 7500-1 standard is taken as a reference in the manner suggested by EN 15654-2 in the paragraph on metrological confirmation; the relevant tests, although not standardised, were nevertheless carried out at an accredited laboratory.

⁴ The ISO 7500-1 standard is taken as a reference in the manner suggested by EN 15654-2 in the paragraph on metrological confirmation; these tests were carried out by comparing a certified fixed reference and under the supervision of the certifying body ITALCERTIFER.

Come si può osservare dalla Tab. 1, l'errore di misura sulla singola ruota quando si trova in campo è circa di un ordine di grandezza maggiore rispetto alle tarature di laboratorio. Questo è il motivo per cui è stato particolarmente importante eseguire le prove in campo durante il processo di certificazione alla EN 15654-2 (vedi paragrafo successivo) così da accertarsi delle reali prestazioni metrologiche derivanti non solo dalle prove di laboratorio, ma anche dalle modalità di utilizzo della strumentazione di misura in campo.

Il sistema POWERVE® oltre alle rampe e alle celle di carico si compone di:

- Acquisition Board (Fig. 4) per ciascuna coppia di celle di carico con lo scopo di acquisire e gestire i valori misurati dalle stesse;
- tablet per gestire l'esecuzione delle misure;
- piattaforma cloud per la gestione del data base delle misure e per l'elaborazione dei dati.

Il tablet, grazie ad una specifica applicazione sviluppata *ad hoc*, provvede a governare l'intero processo di misura e ad inviare sulla piattaforma cloud i risultati ottenuti.

L'applicazione è in grado di seguire una procedura completamente compatibile con la EN 15654-2 e provvede anche a ridurre per quanto possibile l'errore umano. Inoltre, agisce con una logica di sola registrazione rigorosa di quanto avviene senza consentire in nessun caso alterazioni nelle modalità di esecuzione delle misure effettuate e dei risultati ottenuti.

Il report ottenuto fornisce i dati del rotabile misurato, le condizioni di misura e i valori ottenuti secondo le indicazioni della norma.

In altre parole, POWERVE® restituisce in automatico (e in formato non modificabile all'utente) un report digi-

- Acquisition Board (Fig. 4) for each pair of load cells to acquire and manage the values measured by them;
- tablet for managing the execution of measurements;
- cloud platform for managing the measurement database and processing the data.

Thanks to a specially developed application, the tablet guides the measurement process and sends the results to the cloud platform. The application follows a procedure that is fully compliant with EN 15654-2 and reduces human error as far as possible. In addition, it acts with a logic based on strictly recording what happens, without allowing alterations in the measurement process or the results obtained, under any circumstances. The report obtained provides the data about the measured rolling stock, the measurement conditions and the values obtained according to the standard.

In other words, POWERVE® returns automatically (and in a format that cannot be modified by the user) a digital report with the load values measured per wheel ("weighing printout"). These reports are sent automatically to a Cloud (Fig. 5) that collects all the measures associated with a given kit (or client) so that all measurements made can be consulted remotely at any time by accessing the individual reports.

In the Cloud you also have several additional functions that allow you, for example, to view representations of the measurements performed in graphic form as well as to compare the results of two different measurements (same vehicle or same type). In addition, as suggested by EN 15654-2, some specific quantities, obtained from the wheel load, are calculated and represented, e.g. for different unbalance representations.



Figura 4 – Acquisition Board e Tablet con applicativo dedicato.
Figure 4 – Acquisition Board and Tablet with a dedicated application.

tale con i valori del carico misurato per ruota («stampa della pesatura»); questi rapporti sono inviati in automatico in un ambiente *Cloud* (Fig. 5) che provvede a raccogliere tutte le pesature associate ad un determinato kit (o cliente), cosicché da remoto sia possibile consultare in ogni momento tutte le misure effettuate accedendo ai singoli report.

Nel Cloud si dispone inoltre di una serie di funzionalità aggiuntive che consentono ad esempio di visionare rappresentazioni delle misure svolte in forma grafica come di confrontare i risultati di due diverse misurazioni (stesso veicolo o stessa tipologia). Inoltre, come suggerito dalla EN 15654-2, sono calcolate e rappresentate alcune grandezze specifiche, ottenute a partire dal carico per ruota, relative ad esempio a diverse rappresentazioni dello squilibrio.

4. Il processo di certificazione alla norma EN 15654-2

Il processo di certificazione di POWERVE® è stato il risultato di un articolato percorso iniziato nel 2015 con il prodotto ancora nella versione 2.0 quando non era presente una specifica norma di riferimento per la pesatura in condizioni statiche.

In seguito, in parallelo all'evoluzione del prodotto (versione 3.0), il quadro normativo è stato interessato da un

4. The certification process to EN 15654-2

The certification process for POWERVE® was the result of a complex process that began in 2015 with the product still in version 2.0 when there was no specific reference standard for weighing under static conditions.

Subsequently, in parallel with the evolution of the product (version 3.0), the regulatory framework was characterised by an important development that saw the entry into force of railway technical standards that were decidedly more inherent to the subject of interest; in particular Standard EN 15654, [7], collectively referred to as "Railway applications - Measurement of vertical forces on wheels and wheelsets". This European standard was prepared by the Technical Committee CEN/TC 256 "Railway Applications". Under the mandate given to CEN by the European Commission and the European Free Trade Association and supports the Essential Requirements of the EU Directive 2008/57/EC.⁵

The standard is divided into three parts:

- *Part 1: on-track measurement sites for vehicles in service: deals with measurements of wheel forces and axle loads of railway vehicles under dynamic conditions while running.*

⁵ For the relationship with EU Directive 2008/57/EC, reference is made to the informative Attached ZA, which is an integral part of the standard.

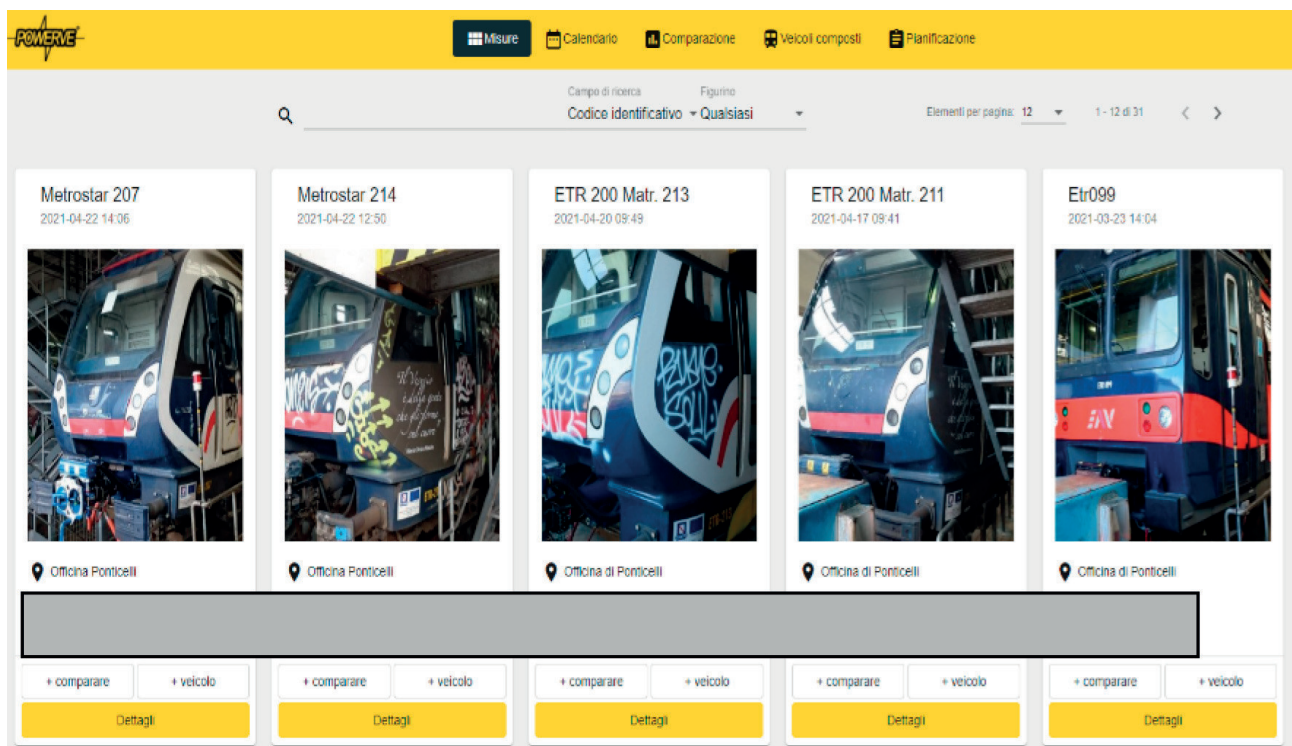


Figura 5 – POWERVE® CLOUD.
Figure 5 – POWERVE® CLOUD.

importante sviluppo che ha visto l'entrata in vigore di norme tecniche ferroviarie decisamente più inerenti alla tematica di interesse; in particolare la Norma EN 15654, [7], collettivamente denominata "Applicazioni ferroviarie – Misura delle forze verticali su ruote e sale montate". Questo standard europeo è stato preparato dal Comitato Tecnico CEN/TC 256 "Applicazioni ferroviarie"; nell'ambito del mandato conferito al CEN dalla Commissione Europea e dall'Associazione Europea per il Libero Scambio e sostiene i Requisiti Essenziali della Direttiva UE 2008/57/CE⁵.

La norma è suddivisa in tre parti:

- Parte 1: misurazione sul binario per veicoli in esercizio si occupa delle misure delle forze sulle ruote e dei carichi per asse di veicoli ferroviari in condizioni dinamiche durante la marcia.
- Parte 2: misure statiche e quasi-statiche della forza sulle ruote di veicoli ferroviari nuovi, modificati o mantenuti in laboratori, copre anche la valutazione delle grandezze derivate, come le forze verticali su sale montate, i carichi per asse e altre grandezze che descrivono la distribuzione delle forze verticali sulle ruote di un veicolo.
- Parte 3: approvazione e verifica dei siti sui binari per veicoli in servizio (CEN/TR) è in preparazione e si occupa dell'approvazione e verifica dei siti di misurazione locali in servizio.

Dopo una stesura in bozza nel 2016, la EN 15654-2 viene pubblicata in versione definitiva nel 2019.

Questa sezione è pertanto rivolta a prove in officina (pesatura in condizioni statiche) e pertanto rappresenta quella più inerente all'impiego del prodotto POWERVE®.

Alla luce di queste indicazioni normative, IVM ha attivato un percorso di certificazione, ottenendo nel 2021, tramite l'organismo notificato ITALCERTIFER, la Certificazione di conformità alla EN 15654-2.

La norma fornisce indicazioni relative ai componenti dell'intero processo di misura a partire dalle condizioni del veicolo e del binario, fino alla rappresentazione dei risultati e del report di misura. La norma pertanto si propone di affrontare la problematica da tutti i punti di vista fornendo un quadro esaustivo del processo che l'operatore deve seguire per una misurazione quanto più veritiera possibile.

Il processo di misura deve tener conto (vedi prospetto in Fig. 6) sia delle caratteristiche dell'oggetto della misura e di quanto ad esso connesso, veicolo, operatore, ambiente di prova (parte alta del prospetto di sintesi), sia delle caratteristiche metrologiche e operative dello strumento di misura, apparecchiatura e procedura di misura, (parte bassa del prospetto di sintesi).

- Part 2: test in workshop for new, modified and maintained vehicles: covers also the evaluation of derived quantities such as vertical forces on wheelsets, axle loads and other quantities describing the distribution of vertical forces on the wheels of a vehicle.
- Part 3: approval and verification of on track measurement sites for vehicles in service: (CEN/TR) is in preparation and deals with approving and verifying local measurement sites in service.

After a draft in 2016, EN 15654-2 was published in a final version in 2019.

This section is aimed at workshop tests (weighing under static conditions) and is, therefore, the one most inherent to the use of the POWERVE® system.

In light of these normative, IVM has activated a certification process that leads to the certification of conformity to EN 15654-2 issued by ITALCERTIFER in 2021.

The standard provides information on the components of the entire measurement process, starting with the vehicle and track conditions, through to the representation of the results and the measurement report. The standard therefore aims to address the issue from all points of view by providing a comprehensive overview of the process that the operator must follow for the most truthful measurement possible.

The measurement process must take into account (see table in Fig. 6) both the characteristics of the measurement object and what is connected to it, the vehicle, operator, test environment (upper part of the summary table), and the metrological and operational characteristics of the measuring instrument, equipment and measurement procedure (lower part of the summary table).

About the vehicle, particular attention must be paid to:

- provide an unambiguous trainpad of the composition according to the nomenclature indicated in the standard;
- indicate the state of the suspensions and dampers;
- decide whether to decouple vehicles from a train set;
- highlight the possible non-centring of the body in relation to the bogies;
- determine the appropriate loading conditions (different depending on whether the vehicle is new-modified or only maintained), according to EN 15663.

It is recommended that the operator is thoroughly trained to be able to detect any malfunctions. The measuring environment must be clean and free of objects that can disturb the measurement; outdoors, special attention must be paid to wind and radiation.

Measurement equipment means both the force-sensitive part of the instrument and how the load is placed on the measurement area and thus the properties of the area itself.

Measurement procedure means how the process is carried out to minimise uncertainties.

⁵ Per i rapporti con la Direttiva UE 2008/57/CE, si fa riferimento all'Allegato ZA informativo, che è parte integrante della norma.

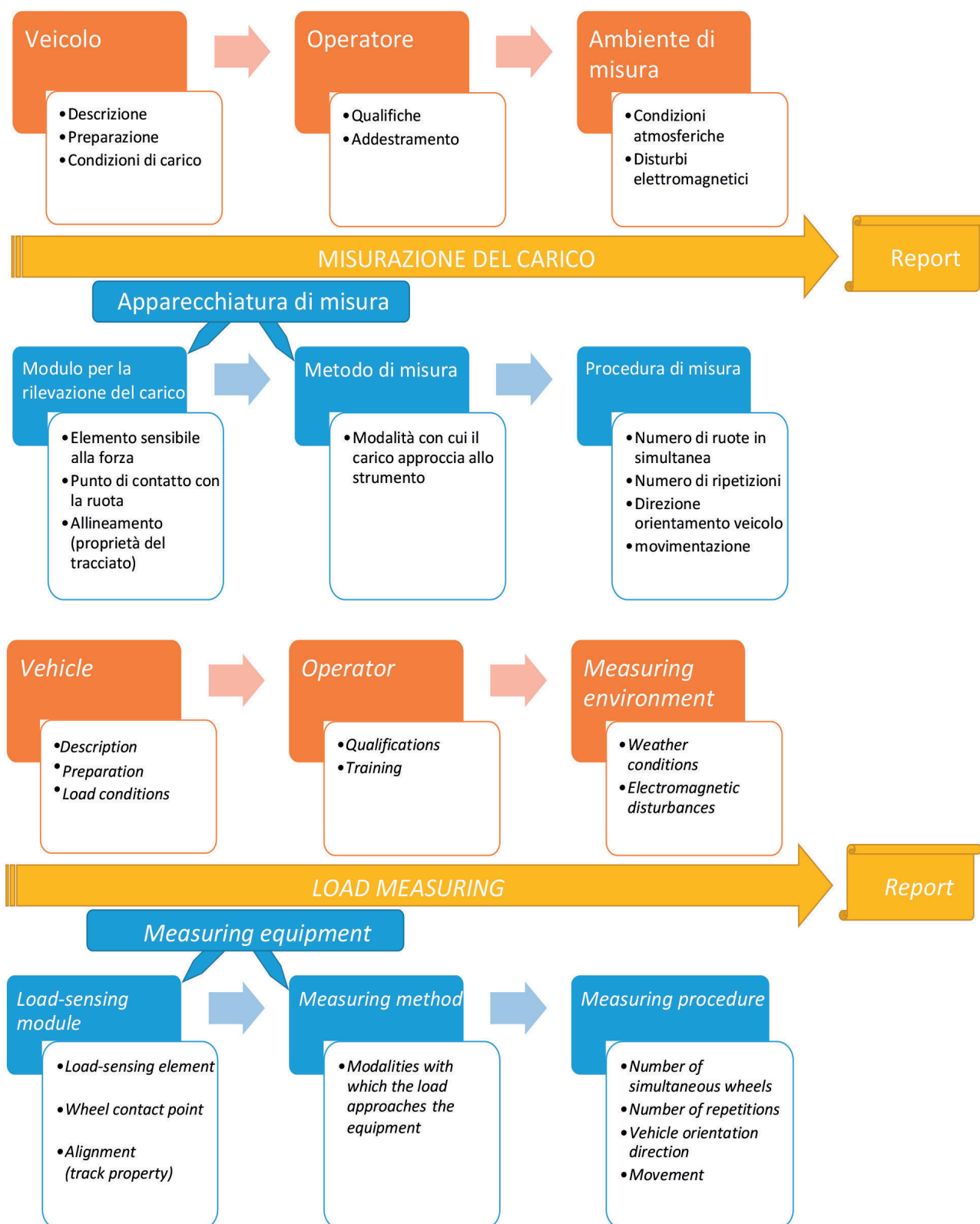


Figura 6 – Prospetto di sintesi della EN 15654-2.
Figure 6 – Summary table of EN 15654-2.

Per quanto riguarda il veicolo si deve porre particolare attenzione a:

- fornire uno schema univoco della composizione secondo la nomenclatura indicata nella norma;
- indicare lo stato delle sospensioni e degli smorzatori;
- decidere se disaccoppiare veicoli facenti parte di una stessa composizione;
- evidenziare il possibile non centraggio della cassa rispetto ai carrelli;
- determinare le opportune condizioni di carico (diverse a seconda se il veicolo è nuovo-modificato o soltanto sottoposto a manutenzione), in base a quanto previsto dalla EN 15663.

È indicato che l'operatore sia addestrato in maniera approfondita in modo da poter cogliere eventuali anomalie di funzionamento. L'ambiente di misura deve essere pulito e privo di oggetti che possono disturbare la misura; all'esterno va posta particolare attenzione al vento e all'irraggiamento.

Per apparecchiatura di misura si intende sia la parte dello strumento sensibile alla forza sia le modalità con cui il carico viene disposto sull'area di misura e quindi le proprietà dell'area stessa.

Per procedura di misura si intende in che modo viene svolto il processo al fine di minimizzare le incertezze.

Per quanto riguarda il modulo di misura esso comprende:

- elementi che supportano la ruota;
- elementi in grado di convertire in grandezza misurabile il carico a cui sono sensibili;
- unità di acquisizione e visualizzazione.

Ogni elemento può essere composto da più unità, anche una per ruota.

Tra i sensori si fa riferimento a celle di carico, estensimetri ma non si preclude alcuna tecnologia; gli strumenti devono essere costruiti e testati in accordo a standard riconosciuti.

È indicato in maniera specifica il punto di contatto con lo strumento che deve essere utilizzato per valutare il carico della ruota, quello ottimale (di riferimento) è il punto della superficie di rotolamento della ruota che poggia sulla rotaia. Possono essere utilizzati altri punti di contatto (boccola o bordino) con lo strumento di misura, ma vanno applicati dei correttivi che non sono definiti in maniera esplicita nella norma.

Nella norma trovano ampio spazio anche prescrizioni inerenti alle caratteristiche geometriche dell'area di misura (e del sistema di misura su esso installato), con l'intento di garantire che i punti di contatto delle ruote del veicolo siano in un piano orizzontale. La sezione di misura deve essere piana, dritta e priva di torsioni, questi requisiti devono essere applicati alla geometria del dispositivo di mi-

For what concern the measuring module, it comprises:

- *elements that support the wheel;*
- *elements capable of converting the load to which they are sensitive into a measurable quantity;*
- *acquisition and display units.*

Each element may consist of several units, even one per wheel. Sensors include load cells, strain gauges but do not preclude any technology; instruments must be produced and tested in accordance with recognised standards.

The point of contact with the wheel load measurement device is specified; the optimum (reference) point is the point on the running surface of the wheel that rests on the rail. Other points of contact (axle box or wheel flange) with the measuring instrument may be used, but corrective calculations must be applied which are not explicitly defined in the standard.

The standard also contains extensive requirements for the geometrical characteristics of the measuring area (and the measuring system installed on it), to ensure that the points of contact of the vehicle wheels are in a horizontal plane. The measuring section must be flat, straight and torsion-free; if measurements are not taken on a track, the alignment of the contact points on the support shall be made in way that it is ensured, that the alignment of the reference points of the wheel treads of the vehicle follows equivalent rules. Detailed indications in this respect refer to quantities in EN 1101 and EN 13848-1.

Static measurements per wheelset, per bogie and for the entire vehicle are permissible; for this purpose, it must be explicitly stated in the measuring method:

- *number of wheelsets measured simultaneously (preferably always the two wheels of the same wheelset simultaneously);*
- *number of repeated measurements to ensure good repeatability;*
- *orientation and direction of measurement of the vehicle (it is preferable to use at least both orientations);*
- *manner in which the vehicle is to be recorded on the instrument.*

In order to fully meet the requirements of the standard, the POWERVE® 3.0 system was further developed to meet all aspects mentioned in Fig. 6.

The certification process of POWERVE® 3.0 verified compliance with the standard by operating according to these main points:

- Documentary and analytical verifications.*
- Compatibility with the railway environment.*
- Performance verifications in the certified laboratory and in the field.*

One of the most important aspects was then the metrological confirmation procedure to be adopted, taking its cue from the appropriate ISO 10012 standard [10]. With this in

sura quando esso non è costituito direttamente dal tracciato. Indicazioni di dettaglio in tal senso fanno riferimento a grandezze riportate nelle normative EN 1101 e EN 13848-1.

Per quanto riguarda il metodo di misura sono ammesse misure statiche per asse, per carrello e per l'intero veicolo; allo scopo va esplicitato nel metodo di misura:

- numero di assi misurati in simultanea (preferibilmente sempre in simultanea quello delle due ruote di uno stesso asse);
- numero di misure ripetute in modo da assicurare una buona ripetibilità;
- orientamento e direzione di misura del veicolo (è preferibile impiegare almeno entrambe le orientazioni);
- modalità con cui il veicolo deve essere registrato sullo strumento.

Per soddisfare in pieno le richieste della norma è stato ulteriormente sviluppato il prodotto POWERVE® 3.0 così da soddisfare tutti gli aspetti richiamati in Fig. 6.

Il percorso di Certificazione di POWERVE® 3.0 ha verificato la corrispondenza con la norma operando secondo questi principali punti:

- Verifiche documentali e analitiche.
- Compatibilità con l'ambiente ferroviario.
- Verifiche prestazionali in laboratorio certificato e in campo.

Uno degli aspetti di maggiore importanza è stato poi quello relativo alla procedura di conferma metrologica da adottare, prendendo spunto dall'apposita normativa ISO 10012 [10]. In quest'ottica, particolare attenzione è stata posta alle modalità di taratura proposte per lo strumento: nella fattispecie si è fatto riferimento alla normativa per le celle di misura di forza (normativa ISO 376 [11]) puntando alla realizzazione di celle di classe almeno pari a 2⁶.

Attraverso un programma di prove in laboratorio (anche in laboratori esterni certificati ACCREDIA) si è verificato che i moduli di pesatura POWERVE® fossero riferibili alla classe 1 (secondo la ISO 376) nell'intero range di forze esaminato (Fig. 7).

Nell'ambito del programma di certificazione del prodotto POWERVE® nella sua versione 3.0, è stata condotta un'ampia e accurata *verifica prestazionale in campo sotto la sorveglianza* ITALCERTIFER presso la loro pesa fissa di FIRENZE OSMANNORO.

Le principali finalità delle attività sperimentali in campo hanno riguardato:

- ✓ Verifiche metrologiche.

mind, particular attention was paid to the calibration methods proposed for the instrument: in this case, reference was made to the standard for force measuring cells (ISO 376 standard [11]), aiming at the realisation of cells of at least class 2⁶.

Through a programme of laboratory tests (also in ACCREDIA-certified external laboratories), it was verified that the POWERVE® weighing modules were traceable to class 1 (according to ISO 376) over the entire force range examined (Fig. 7).

As part of the certification programme for the POWERVE® product in its version 3.0, an extensive and thorough field performance verification was conducted under ITALCERTIFER's supervision at their fixed weighing in FLORENCE OSMANNORO.

The main aims of the experimental field activities concerned:

- ✓ *Metrological verifications.*
- ✓ *Compatibility of the measurement process with the operational prescriptions and the environment of use.*

In detail, the following objectives were achieved:

- Assess the repeatability of the POWERVE® measurement system with respect to a known load.*
- Evaluate the differences in the results obtainable in the field with respect to those returned by a certified measurement system.*
- Verify that the measuring process of a portable system is compatible with typical railway environments (yards, workshops).*
- Identify possible criticalities in the instrument or in the operating procedure for a portable type instrument (installation/measurement time, transportability).*
- Identify factors that may influence measurement with POWERVE®, e.g., wheel diameter, weight per wheelset.*

In general, these tests were therefore designed not only to verify the performance properties of the POWERVE® product (see points A and B) but also to assess the operational capabilities of the product. In particular, this aspect of verification is aimed both at the respect of compatibility with typical scenarios of the railway world (yards, workshops) and the respect of operational procedures for the use of such an instrument. For a portable system, they certainly concern the simplicity of transport and installation, as well as the rapidity of execution of measurements (see points C and D). Finally, was also checked if any specific factors may systematically influence the measurement carried out with POWERVE® such as wheel diameter and weight per wheelset (see point E).

⁶ È possibile, in prima approssimazione, considerare che le celle di classe 2 secondo la ISO 376 hanno parametri prestazionali prossimi alla classe 0.5 secondo la ISO 7500-1.

⁶ It is possible, as a first approximation, to consider that class 2 cells according to ISO 376 have performance parameters close to class 0.5 according to ISO 7500-1.

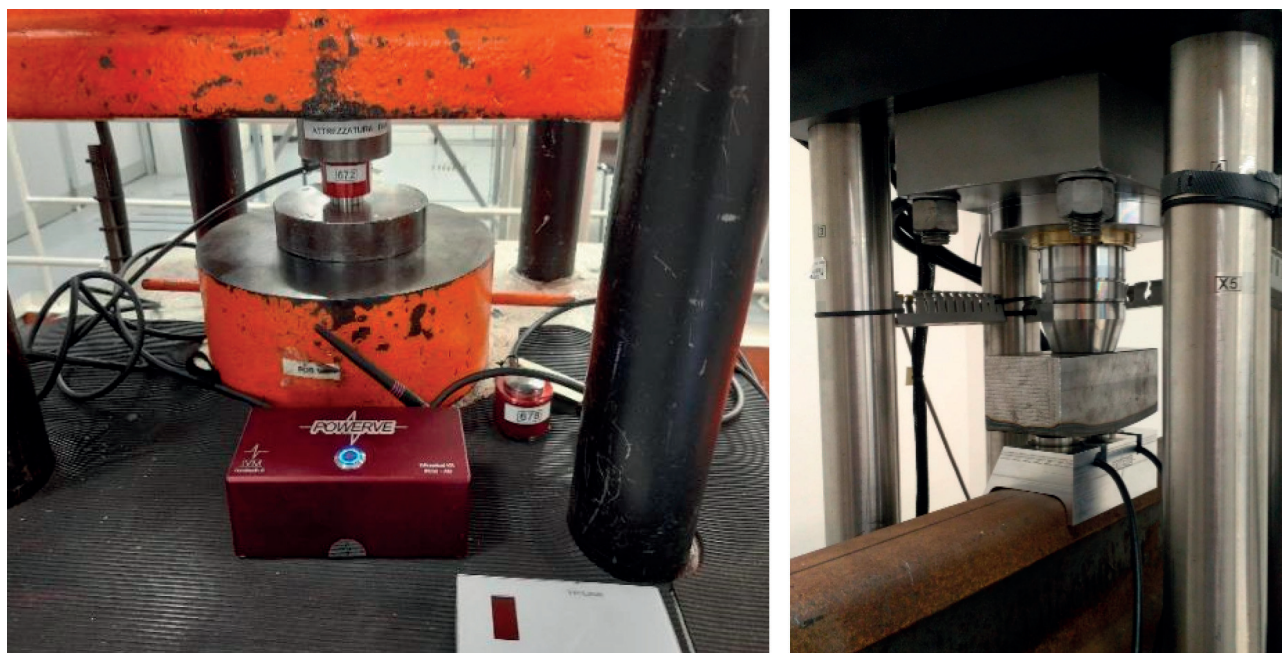


Figura 7 – Prove in laboratorio.
Figure 7 – Laboratory tests.

- ✓ Compatibilità del processo di misura con le prescrizioni operative e l'ambiente di utilizzo.

Nel dettaglio sono stati conseguiti i seguenti obiettivi:

- A. Valutare la ripetibilità del sistema di misura POWERVE® rispetto ad un carico noto.
- B. Valutare le differenze dei risultati ottenibili in campo rispetto a quanto restituito da un sistema di misura certificato.
- C. Verificare che il processo operativo di misura di un sistema portatile sia compatibile con gli ambienti tipici del ferroviario (piazzali, officine).
- D. Individuare possibili criticità dello strumento o nella procedura di utilizzo per uno strumento di tipo portatile, (tempo di installazione/esecuzione misura, trasportabilità).
- E. Individuare fattori che possono influenzare la misura con POWERVE®: diametro ruota, peso per asse.

In linea generale queste prove sono state progettate quindi non soltanto per la verifica delle proprietà prestazionali del prodotto POWERVE® (vedi punti A e B), ma anche per una valutazione delle capacità operative del prodotto. In particolare, questo aspetto di verifica è rivolto sia al rispetto della compatibilità con scenari tipici del mondo ferroviario (piazzali, officine), sia al rispetto delle procedure operative di utilizzo di uno strumento che, essendo per sua natura portatile, riguardano certamente la semplicità di trasporto e installazione, nonché la rapidità di esecuzione delle misurazioni (vedi punti C e D). Infine,

In this case, therefore, comparative tests were carried out on the POWERVE® measurement system with respect to the fixed scale available to ITALCERTIFER, measuring vehicles both “simultaneously”, i.e., with the POWERVE® system placed on the fixed scale, and “deferred”, i.e., weighing a vehicle first on the fixed scale and then on a portion of track outside the weighing area. Three vehicles were subjected to multiple weighing, including one specially built for this type of verification, a sample bogie, a commercial bogie, a locomotive (Fig. 8).

The use of POWERVE® at the same time and in combination with the fixed weighbridge has made it possible to make precise comparisons both on the total weight and on the unloaded one per wheel.

Tab. 2 shows the repeatability errors from the different tests, as the average of the different elements of the same type and the average indication error per wheel (Tab. 3).

POWERVE® 3.0 system has proven compliant with the metrological performance defined by EN 15654-2. Therefore, with reference to the classes reported in ISO 7500-1 [12], capable of returning the weight of a vehicle, i.e., the sum of the weight of all wheels measured by POWERVE®, with an indication error of less than 0.5%, i.e., a performance classifiable as Class 0.5, just as required by the aforementioned standard.

Overall, it is certified (Fig. 9) [13] that the POWERVE® system is fully compliant with the execution of a weighing according to the industry standards: EN 15654-2 and EN 50215.

si è anche voluto verificare se esistono dei fattori specifici che possono influenzare sistematicamente la misura condotta con POWERVE® come il diametro ruota, peso per asse (vedi punto E).

Nella fattispecie, dunque, sono state svolte delle prove comparative del sistema di misura POWERVE® rispetto alla pesa fissa a disposizione della stessa ITALCERTIFER, misurando opportuni veicoli sia “in contemporanea”, ossia con il sistema POWERVE® disposto sulla pesa fissa, sia “in differita”, ossia pesando un mezzo prima sulla pesa fissa e poi su una porzione di binario in esterna alla zona di pesa. Sono stati sottoposti a più pesature ben tre mezzi, tra cui uno costruito appositamente per questo tipo di verifica, carrello campione, altri di tipo commerciale, carrozza, locomotore (Fig. 8).

5. Vertical load control and implications for maintenance cycles

As illustrated above, the TSI LOC&PAS technical specification of interoperability updated to 2020, considers a limit of 5% for the lateral imbalance for rolling stock circulation for safety (this limit was then transposed by ANSF⁷ Decree no. 1/2016).

This limit, which highlights the greater sensitivity of the regulatory bodies to the vertical force distribution topic, raises questions about the adequacy of current bogie maintenance plans aimed at keeping the rolling stock within the limits of the maximum permitted imbalance.

⁷ Today ANSFISA.



Figura 8 – Prove in campo: pesatura del carrello campione, pesatura di altri veicoli sulla pesa fissa e all'esterno.
Figure 8 – Field tests: weighing of the sample bogie, weighing of other vehicles on the fixed scale and outside.

L'impiego di POWERVE® in contemporanea e in accoppiata alla bilancia fissa, ha consentito di effettuare confronti puntuali sia sul peso complessivo che su quello scaricato per ruota.

In Tab. 2 sono riportati gli errori di ripetibilità emersi nelle diverse prove, come media dei diversi elementi di uno stesso tipo e l'errore di indicazione medio per ruota (Tab. 3).

Inoltre dal punto di vista della compatibilità della prestazione metrologica con le norme, il prodotto POWERVE® 3.0 è risultato conforme alle prestazioni metrologiche definite dalla EN 15654-2 e quindi, in riferimento alle classi riportate nella ISO 7500-1 [12], in grado di restituire il peso di un veicolo, ossia la somma del peso di tutte le ruote misurate da POWERVE®, con un errore di indicazione inferiore allo 0.5%, ossia una prestazione classificabile come Classe 0.5, proprio come richiesto dalla citata norma.

In definitiva risulta certificato (Fig. 9) [13] che il sistema POWERVE® è del tutto conforme all'esecuzione di una pesatura ai sensi delle norme di settore: EN 15654-2 e EN 50215.

Maintenance operations aim at maintaining, within certain limits, the performance conditions of rolling stock over time; therefore, the condition of lateral imbalance, defined by regulations, should also be a constituent part of a good maintenance programme.

In this perspective, besides the checks carried out during the homologation phase and the scheduled checks, maintenance interventions that can identify possible variations caused by events or conditions of use that led to a degradation of the condition of equilibrium should be identified, regardless of the usual time interval of the scheduled maintenance activities. In other words, it is desirable to implement maintenance programmes that also work on-condition, to face such stringent limits dictated by the need to control delicate issues that are also inherent to safe [14][15]. In practice, one can think of monitoring over time (under static workshop conditions) the wheel load distribution, which also has diagnostic significance because it correlates with the condition of the suspension and the geometry of the bogie. This could mean:

- *increasing the frequency of weight measurements during maintenance activities;*

Tabella 2 – Table 2


Errore di ripetibilità per i vari veicoli esaminati
Repeatability error for the various vehicles tested

Errore di ripetibilità (%) <i>Repeatability error (%)</i>					
Elemento/Veicolo <i>Element/Vehicle</i>	Carrello Campione <i>Sample bogie</i>	Carrello campione (B) <i>Sample bogie (B)</i>	Carrozza <i>Carriage</i>	Locomotore <i>Locomotor</i>	Media Veicol <i>Average vehicle</i>
Ruote <i>Wheels</i>	0.2	0.3	0.3	0.7	0.4
Assi <i>Axles</i>	0.2	0.3	0.2	0.4	0.3
Carrello <i>Bogie</i>	0.2	0.2	0.1	0.3	0.2

Tabella 3 – Table 3

Errore di indicazione medio per i vari veicoli esaminati
Average indication error for the various vehicles tested

Errore di indicazione (%) <i>Indication error (%)</i>						
Prova Veicolo <i>Field tests</i>	Carrello Campione <i>Sample bogie</i>	Carrello Campione b <i>Sample bogie b</i>	Carrozza C1 <i>Carriage C1</i>	Carrozza C2 <i>Carriage C2</i>	Locomotore <i>Locomotor</i>	Media Prove <i>Average Evidence</i>
Media (Carrello o totale) <i>Average (Bogie or total)</i>	0.0	0.2	0.6	0.8	0.3	0.4

	RAPPORTO DI VALUTAZIONE	Rev. 0.0
	ITCF-C19222-11-ATF-RA-00011	Pag. 1 di 44



sede operativa:
 Via Benedetto Brin, 59
 80142 Napoli
 Tel +39 081 18896300
 web: www.ivmtech.it
 pec: ivmtech@pec.it
 mail: info@ivmtech.it

This translation has been written by IVM staff for informational purposes only.
 It aims to inform the foreign reader of 3/44 pages content of the Assessment Report (ITCF-C19222-11-ATF-RA-0001), issued for the first time by ITALCERTIFER on 1st March 2021, elaborated by Mr. Luca Baronti, verified by Mr. Giuseppe Pancari and approved by Mr. Giampaolo Mancini.

Rapporto di Valutazione

(Page 1 of 44)

**Valutazione della conformità ai requisiti delle
 Norme EN 15654-2:2019 e EN 50215:2011
 del sistema portatile per la misura del carico
 verticale denominato POWERVE**

Assessment Report

**Assessment activity for the verification of
 compliance to the requirements of the EN
 15654-2: 2019 and EN 50215: 2011 Standards
 of the portable weighing system for railway
 vehicles called POWERVE**

0.0	01/03/2021	Prima emissione	Luca Baronti	Giuseppe Pancari	Giampaolo Mancini
Rev.	Data	Descrizione	Redazione	Verifica	Approvazione

IVM s.r.l. - p.iva 07729051210 rea na 905419 - cap. soc. €80.000,00 i.v.
 sede legale: Piazza Principe Umberto I, 15 - 80053 Castellammare di Stabia (NA)

Figura 9 – Certificazione sistema POWERVE (Certificato originale italiano e traduzione in inglese).
 Figure 9 – POWERVE system certification (Original Italian certificate and English translation).

5. Controllo del carico verticale e risvolti sui cicli manutentivi

Come illustrato precedentemente, la specifica tecnica di interoperabilità STI LOC&PAS aggiornata al 2020, considera per la sicurezza un limite dello sbilanciamento laterale del 5% per la circolazione del materiale rotabile (tale limite è stato poi recepito dal Decreto ANSF⁷ n. 1/2016).

Questo limite, che evidenzia la maggiore sensibilità degli enti regolatori verso gli aspetti di distribuzione della forza verticale, pone degli interrogativi rispetto all'adeguatezza degli attuali piani manutentivi dei carrelli che abbiano l'obiettivo di mantenere il rotabile nei limiti del massimo sbilanciamento ammesso.

Le operazioni di manutenzione sono per loro natura orientate a mantenere inalterato, entro certi limiti, le condizioni di prestazioni di un rotabile nel tempo; pertanto, anche la condizione di sbilanciamento laterale, definita nei limiti delle normative, dovrebbe essere parte costitutiva di un buon programma manutentivo.

- introducing measurements for diagnostic purposes in order to pinpoint critical phases in a timely manner.

To this purpose, the availability of a portable system that is easy to install, quick to use and has certified metrological characteristics suitable for monitoring even small imbalance variations in imbalance, makes it possible to increase the frequency of checks without negatively impacting operations. A higher frequency of measurement makes it possible to follow in more detail the evolution of any serious problems, which affect both safety and the degradation of the infrastructure and the rolling stock itself. All this can lead to a reduction in the maintenance cost of the infrastructure. Experience gained in the field by measuring different types of rolling stock (s), all of them during the interval between two successive Level 2 maintenance operations, has identified a significant criticality in the state of imbalance of the wheelsets of several rolling stocks.

Fig. 10 shows the result of a survey carried out on 41 wagons (all 2 bogies) belonging to regional trains, high-speed trains and various trains in Europe. Imbalanced wheelsets by more than 5% in relation to the total number of wheelsets in each car are highlighted in red.

⁷ Oggi ANSFISA.

In quest'ottica, oltre alle verifiche condotte in fase di omologazione e le verifiche programmate, andrebbero individuati degli interventi di manutenzione in grado di cogliere possibili mutamenti causati da eventi o condizioni d'uso che abbiano condotto ad un degrado della condizione di equilibrio, indipendentemente dall'intervallo di tempo considerato a priori da una manutenzione programmata. In altre parole, di fronte a limiti così stringenti, dettati dalle necessità di controllare problematiche delicate perché inerenti anche alla sicurezza, è auspicabile la messa in opera di programmi manutentivi che lavorino anche *on condition* [14][15]. In pratica si può pensare di monitorare nel tempo (in condizioni statiche di officina) la distribuzione della forza peso scaricata sulle ruote, che ha anche un significato diagnostico perché correlabile alla condizione delle sospensioni e della geometria del carrello. Questo potrebbe significare:

- aumentare la frequenza di misura del peso durante gli interventi manutentivi;
- introdurre misure a scopo diagnostico così da individuare in maniera puntuale le fasi critiche.

A questo scopo la disponibilità di un sistema di tipo portatile, di facile installazione, di rapido utilizzo e con caratteristiche metrologiche certificate e adeguate a monitorare anche piccole variazioni dello squilibrio, consente di aumentare la frequenza di controlli senza impattare negativamente sull'esercizio. Una maggiore frequenza di misura consente di seguire più in dettaglio l'evoluzione di eventuali problematiche gravose, che impattano sia sulla sicurezza e sia sul degrado dell'infrastruttura e del rotabile stesso.

Tutto ciò può determinare una riduzione dei costi di gestione di una linea.

L'esperienza maturata in campo misurando rotabili di diversa natura, ma tutti durante l'intervallo fra due successivi interventi di manutenzione di 2° livello, ha individuato una notevole criticità nello stato di sbilanciamento delle sale di diversi rotabili.

In Fig. 10 è riportato il risultato di un'indagine eseguita su 41 vagoni (tutti a 2 carrelli) appartenenti a treni regionali, treni alta velocità e treni vari in Europa. In rosso vengono evidenziate le sale sbilanciate oltre il 5% rispetto al numero totale di sale di ciascun vagone.

Occorre sottolineare che la totalità questi treni esaminati sono stati messi in servizio prima dell'introduzione della STI LOC&PAS e pertanto non sono vincolati allo sbilanciamento limite del 5%. Tuttavia, queste misure stanno ad indicare che possono capitare condizioni di degrado progressivo dei carrelli che portano ad uno sbilanciamento oltre il 5% delle sale anche durante l'intervallo fra due interventi di manutenzione di 2° livello. Inoltre, nella quasi totalità dei casi si aveva anche uno squilibrio delle diagonali che induce a pensare ad un problema dovuto alla non uniformità della rigidità delle sospensioni primarie.

Questi dati suggeriscono di misurare con maggiore

It should be emphasised that all of these trains examined were put into service before the introduction of the LOC&PAS TSI and are therefore not bound by the 5% limit of imbalance. However, these measures indicate that conditions of progressive degradation of the bogies leading an imbalance higher than 5% can occur even during the interval between two maintenance operations at level 2. Furthermore, in almost all cases there was also an imbalance of the diagonal loads, which leads one to think of a problem due to uneven stiffnesses of the primary suspensions. These data suggest that the wheel load distribution should be measured more frequently in order to detect any abnormal imbalances. For this purpose, as described below, a measurement campaign dedicated to monitoring the evolution of bogie degradation as a function of time and/or kilometres travelled has begun at EAV.

6. Effects of imbalances on running dynamics and wear

This section will illustrate some results obtained with simulation with the aim of understanding the influence of vertical wheel load imbalances on the dynamics of a railway vehicle and on wheel wear indices.

Fig. 11 shows an attempt to summarise the importance of monitoring the vertical load per wheel with regard to various technical aspects of interest in the railway context.

In order to analyse the effects of the imbalances presented above, a multibody model of a railway vehicle [16] was developed in Simpack environment, composed of a railway car with two bogies, standard gauge, S1002 wheels in contact with UIC 60 1:40 rails.

A reference track was subsequently defined consisting of straight sections, two opposite curves of constant radius of 300 m, transition clotsoids and a full curve cant of 16 cm. The vehicle's forward speed was set at 80 km/h, resulting in an uncompensated acceleration in a curve of 0.6 m/s². The vehicle model and track details are shown in Fig. 12a and Fig. 12b respectively.

Three simulations were carried out for different levels of vertical wheel load deviation of the front wheelset of the front bogie: 0%, 5% and 10%.

The running safety indicators were taken from EN 14363; in particular, the derailment index and the wheel-unloading factor were used.

Fig. 13a and Fig. 13b show the results of the simulations for the 5% and 10% imbalances in terms of increased risk of derailment and increased wheel load transfer compared to the balanced vehicle.

The effects of imbalances on wheel wear were simulated by adopting the wear energy formulation that relates the amount of removed material to the energy dissipated in the wheel-rail contact through the wear index [17]. The dynamic simulation provides as output the set of information of the wheel-rail contact for each wheel of the vehicle, this

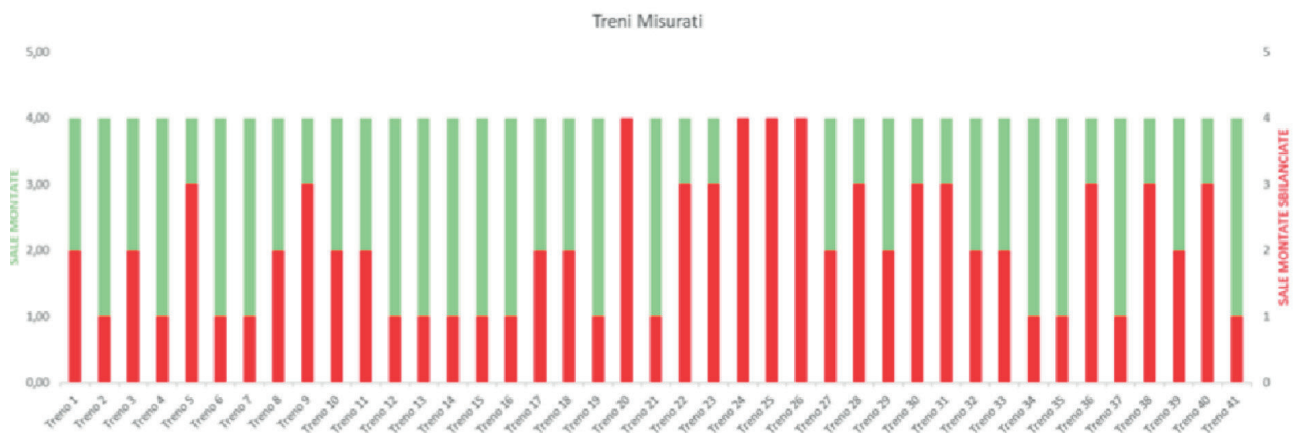


Figura 10 – Indagine eseguita su 41 vagoni a 2 carrelli per individuare le sale sbilanciate oltre il 5%.
 Figure 10 – Investigation carried out on 41 carriages composed of 2-bogie wagons to identify wheelsets imbalanced by more than 5%.

frequenza la distribuzione della forza peso sulle ruote così da individuare eventuali squilibri anomali.

Allo scopo, così come viene descritto di seguito, è iniziata in EAV una campagna di misure dedicata al monitoraggio dell'evoluzione del degrado dei carrelli in funzione del tempo e/o dei chilometri percorsi.

6. Effetti degli sbilanciamenti sulla dinamica di marcia e sull'usura

In questo paragrafo saranno illustrati alcuni risultati ottenuti in simulazione con l'obiettivo di comprendere l'influenza di sbilanciamenti di carico verticale per ruota sulla dinamica di un veicolo ferroviario e sugli indici di usura ruota.

Nella Fig. 11 è riportato uno schema in cui si è cercato di sintetizzare l'importanza del monitoraggio del carico verticale per ruota nei confronti di vari aspetti tecnici di interesse nell'ambito ferroviario.

Al fine di analizzare gli effetti degli sbilanciamenti presentati in precedenza è stato sviluppato un modello *multibody* di veicolo ferroviario [16], in ambiente Simpack, composto da una cassa e due carrelli, scartamento standard, ruote S1002 a contatto con rotaie UIC 60 1:40.

È stato definito successivamente un tracciato di riferimento composto da tratti rettilinei, due curve di verso opposto di raggio costante pari a 300 m, clotoidi di transizione e una sopraelevazione in curva piena di 16 cm. La velocità di avanzamento del

information was processed by a wear estimation algorithm that gives as result the amount of material removed [18]. The calculation diagram is depicted in Fig. 14.

Fig. 15 shows the development of the area of material removed by wear as a function of mileage.

It can be seen that the increase in the area of material removed for a 5% imbalance is 11.3% and for a 10% imbalance is 19.3%. The wear algorithms allow to estimate the change in wheel lifetime as a function of imbalance; Fig. 16 shows the comparison between the two cases, again with reference to the perfect vertical load distribution condition.

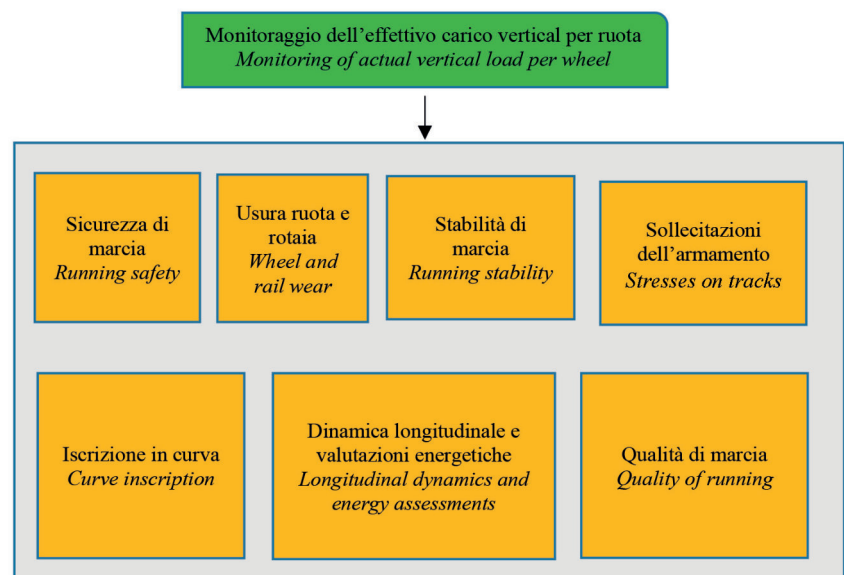


Figura 11 – Sintesi degli effetti del carico verticale per ruota su aspetti della dinamica di marcia.

Figure 11 – Summary of the effects of vertical wheel load on aspects of driving dynamics.

veicolo è stata fissata pari a 80 km/h la quale comporta un'accelerazione non compensata in curva pari a 0.6 m/s^2 . Il modello di veicolo ed i dettagli del tracciato sono riportati rispettivamente in Fig. 12a e Fig. 12b.

Sono state eseguite tre simulazioni relative a differenti livelli di squilibrio del carico verticale tra la ruota destra e la ruota sinistra della sala anteriore del carrello anteriore: 0%, 5% e 10%.

La scelta degli indicatori di sicurezza di marcia è stata fatta a partire dalla norma EN 14363, in particolare ci si è riferiti all'indice di svio e al fattore di scarico ruota.

Nelle Fig. 13a e Fig. 13b sono presentati i risultati delle simulazioni relative agli sbilanciamenti del 5% e del 10% in termini di incremento del rischio svio e di incremento dello scarico ruota rispetto al veicolo bilanciato.

Gli effetti degli sbilanciamenti sull'usura ruota sono stati simulati adottando la formulazione energetica di usura che mette in relazione la quantità di materiale asportato

The results presented in this section clearly showed the correlation between uneven vertical wheel load distribution and increased wear. Consequently, the monitoring of the vertical wheel/rail load would also be very useful for maintenance purposes. As an example, the Vertical Load Measurement Station (SMCV) allows the measurement of the load transmitted to the track by the wheels of railway vehicles in composition during their transit [19][20]. Based on the measurements made by the weighbridge, the SMCV provides the control station with the following information:

- vertical load (consisting of empty weight force, travelling load weight force and inertial forces) transmitted to the track by each vehicle wheel
- axle load;
- load imbalance index between the wheels of the same axle.

This technology is of interest and in combination with a POWERVE portable weighing system can help railway com-

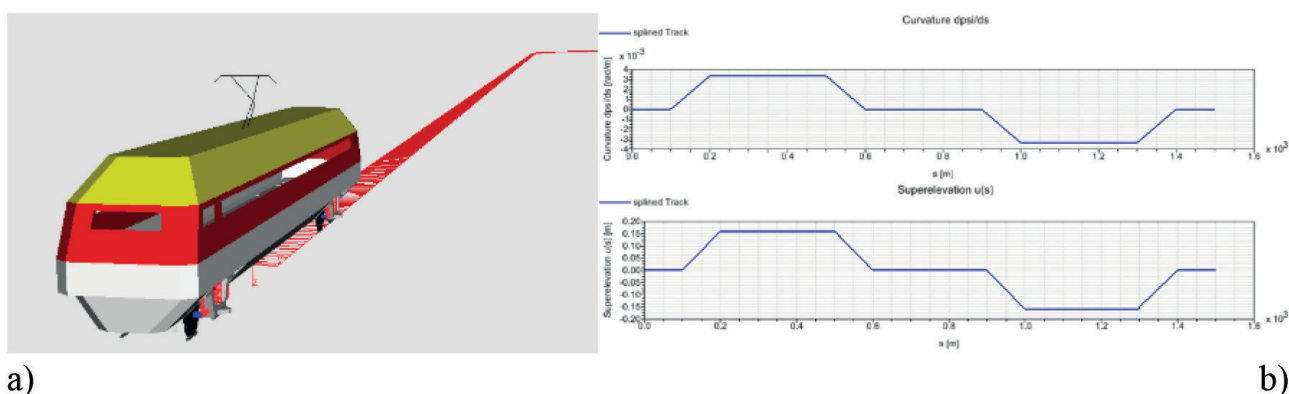


Figura 12a e Figura 12b – Modello del veicolo (a) e definizione del tracciato (b).
Figure 12a and Figure 12b – Vehicle model (a) and track definition (b).

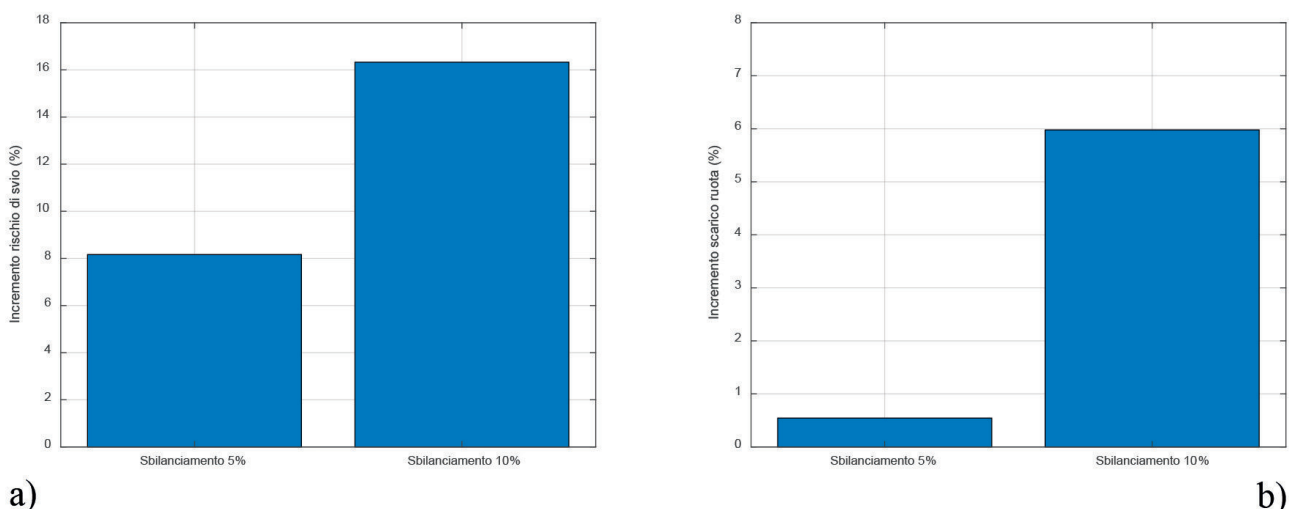


Figura 13a e Figura 13b – Incremento rischio di svio (a) e incremento scarico ruota (b).
Figure 13a and Figure 13b – Increased risk of derailment (a) and increased wheel unloading (b).

con l'energia dissipata nel contatto ruota-rotaia attraverso l'indice di usura (*wear index*) [17]. La simulazione dinamica fornisce in uscita il set di informazioni del contatto ruota-rotaia per ogni ruota del veicolo, tali informazioni sono state elaborate da un algoritmo di stima usura che fornisce come risultato la quantità di materiale asportato [18]. Lo schema di calcolo è rappresentato in Fig. 14.

La Fig. 15 mostra l'andamento della area di materiale asportato per usura in funzione della percorrenza.

Si nota che l'incremento dell'area di materiale asportato per uno sbilanciamento del 5% è pari a 11.3% e per uno sbilanciamento del 10% è pari a 19.3%.

Gli algoritmi di usura hanno permesso di stimare la variazione di vita utile delle ruote in funzione degli sbilanciamenti, sempre in riferimento alla condizione di perfetta distribuzione del carico verticale. In Fig. 16 è mostrato il confronto tra i due casi:

I risultati presentati in questo paragrafo hanno chiaramente evidenziato la correlazione tra una non uniforme distribuzione del carico verticale per ruota e l'incremento dell'usura. Di conseguenza anche il monitoraggio del carico verticale ruota-rotaia in linea risulterebbe molto utile ai fini manutentivi. A titolo di esempio, il Sistema Misura Carichi Verticali (SMCV) permette la misurazione del carico trasmesso al binario dalle ruote dei veicoli ferroviari in composizione durante il loro transito [19][20].

Sulla base delle misure effettuate dalla pesa, il SMCV fornisce al posto di controllo le seguenti informazioni:

- carico verticale (composto da forza peso a vuoto, forza peso del carico viaggiante e forze inerziali) trasmesso al binario da ciascuna ruota del veicolo;
- carico per asse;
- indice di squilibrio di carico tra le ruote di uno stesso asse.

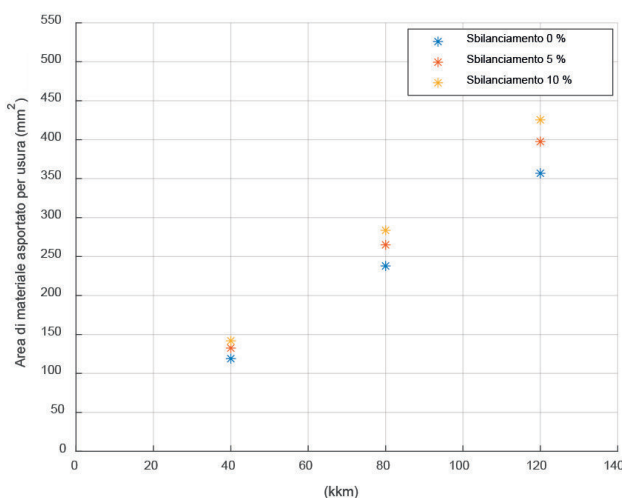


Figura 15 – Area di materiale asportato per usura.
Figure 15 – Area of material removed due to wear.

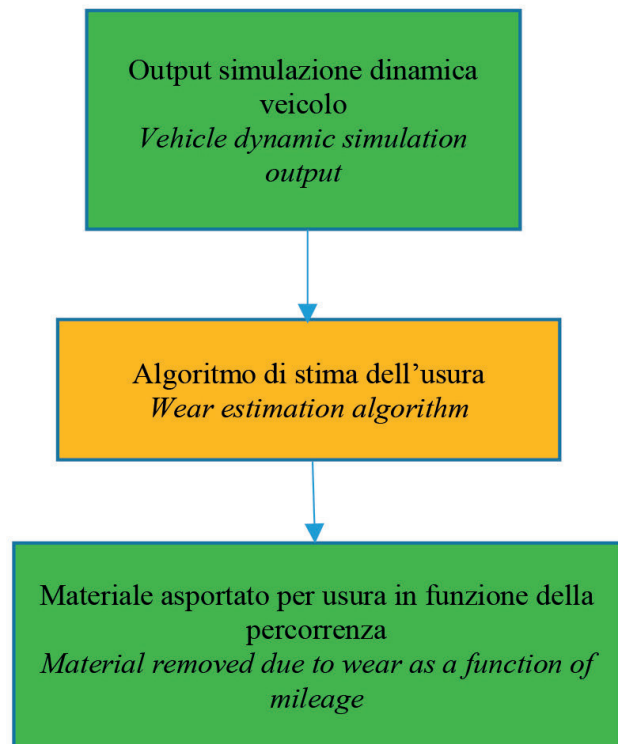


Figura 14 – Schema di calcolo dell'usura ruota.
Figure 14 – Wheel wear calculation diagram.

panies to monitor the load conditions in operation and the maintenance conditions of rolling stock.

7. Testing a new rolling stock maintenance model

EAV has always been committed to optimising the management of infrastructure and rolling stock in order to reduce operating costs.

In this context, it has recently started an activity aimed at optimising wheel wear by introducing innovations in maintenance management. To this end, experimental activities started that are based on the monitoring of:

- the imbalanced condition of the bogie wheelsets;
- the uneven wear of the wheels on the rolling circle.

This activity attempts to give some experimental evidence to the hypotheses that come out of the numerical modelling carried out by the University and described in the previous paragraph.

It is quite evident that wheel wear is predominantly a function of the kilometres travelled; it is also evident that less-than-perfect suspension conditions can accelerate the wear process. In particular, the imbalance of a wheelset can be a parameter that significantly influences the wear phenomenon, as described by the numerical modelling carried out by the University. Such a qualitative diagram shown in

Tale tecnologia risulta interessante e congiuntamente ad un sistema portatile di pesatura POWERVE può contribuire al supporto delle imprese ferroviarie per monitorare le condizioni di carico in esercizio e le condizioni di manutenzione dei rotabili.

7. La sperimentazione di un nuovo modello di manutenzione rotabili

EAV è sempre stata impegnata ad ottimizzare la gestione delle infrastrutture e del materiale rotabile così da ridurre i costi di gestione.

In tale ambito ha di recente iniziato un'attività mirata ad ottimizzare l'usura delle ruote introducendo innovazioni nella gestione della manutenzione. Allo scopo si sono avviate attività sperimentali che si basano sul monitoraggio di:

- le condizioni di sbilanciamento delle sale dei carrelli;
- la non uniforme usura delle ruote sul circolo di rotolamento.

Questa attività cerca di dare qualche evidenza sperimentale alle ipotesi che vengono fuori dalla modellazione numerica effettuata dall'Università e descritta al paragrafo precedente.

È del tutto evidente che l'usura delle ruote è prevalentemente funzione dei chilometri percorsi, è altresì evidente che condizioni delle sospensioni non perfette possono accelerare il processo di usura. In particolare, lo squilibrio di una sala, così come descritto dalla modellazione numerica effettuata dall'Università, può essere un parametro che influisce significativamente sul fenomeno di usura.

In pratica un diagramma qualitativo del tipo riportato in Fig. 17 potrebbe descrivere un ipotetico andamento dell'usura in funzione dei chilometri percorsi e parametrizzato nello squilibrio della sala.

Scopo dell'attività sperimentale è trovare qualche conferma all'ipotesi di usura. Per ottenere ciò si è proceduto ad individuare un sottoinsieme della flotta di treni Circumvesuviana sui quali effettuare periodicamente una misura del profilo delle ruote associata alla misura della distribuzione dei pesi sulle ruote di un carrello e quindi lo sbilanciamento delle sale. Allo stato attuale il database comprende le misure, profilo ruota e carico per ruota (ad una determinata data e per un determinato chilometraggio), di circa una dozzina di treni della flotta EAV sia del tipo T21, della linea circumvesuviana a scartamento ridotto, sia del tipo ETR5XX di Firema, della linea cumana/circumflegrea a scartamento ordinario.

L'obiettivo è quello di dimostrare che all'aumentare dei km percorsi si ottiene un maggiore aumento dell'usura delle ruote maggiormente caricate e quindi evidenziare che un treno sbilanciato necessita di una manutenzione più frequente.

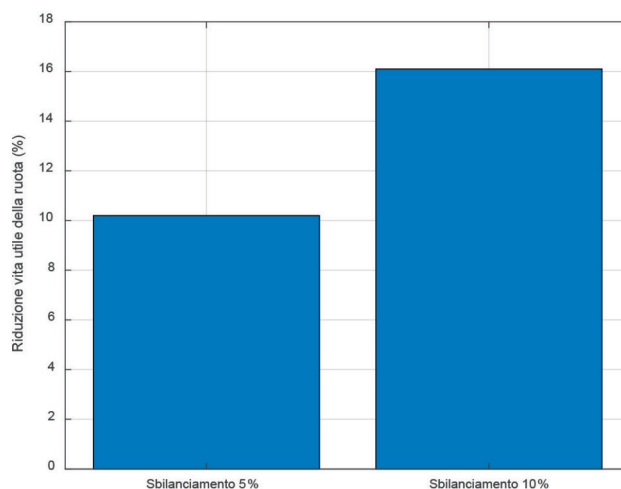


Figura 16 – Percentuale di riduzione vita utile della ruota.
Figure 16 – Wheel life reduction percentage.

Fig. 17, could describe a hypothetical wear trend as a function of kilometres travelled and parameterised in the imbalance of the wheelset.

The experimental activity aims to find some confirmation of the wear hypothesis. To achieve this, a subset of the Circumvesuviana (EAV) train fleet was identified on which a wheel profile measurement associated with the measurement of the wheel load distribution of a bogie (and thus the imbalance of the wheelsets) was periodically carried out. At present, the database includes the measurements, wheel profile and wheel load (at a given date and for a given mileage), of about a dozen trains of the EAV fleet both of the T21 type, of the narrow-gauge Circumvesuviana line, and of the Firema ETR5XX type, of the ordinary-gauge Circumflegrea line.

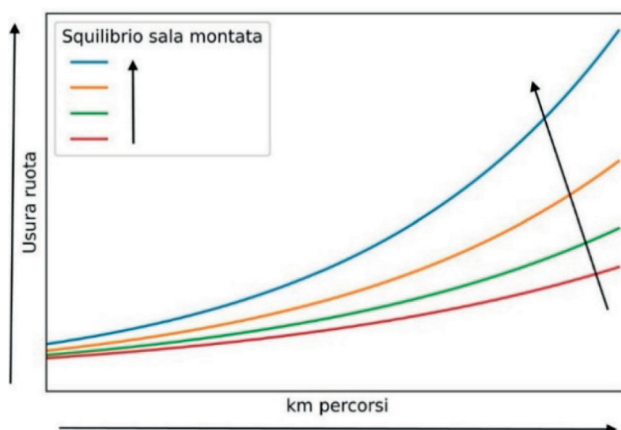


Figura 17 – Andamento dell'usura ruota in funzione della percorrenza e per valori crescenti di squilibrio della sala montata.

Figure 17 – Trend of wheel wear as a function of mileage and for increasing values of wheel-set imbalance.

8. Conclusioni

La misura della distribuzione della forza peso scaricata in condizioni statiche da ciascuna ruota di un carrello sul binario ha un contenuto informativo di tipo diagnostico relativamente alle condizioni delle sospensioni e delle condizioni geometriche.

La distribuzione uniforme di queste forze è sempre stata considerata di grande importanza ai fini della dinamica di marcia e quindi ai fini della sicurezza di esercizio.

La pubblicazione a livello Europeo di una norma la EN 15654-2 dedicata alla modalità di determinazione della distribuzione della forza verticale in condizioni statiche, sta ad indicare propriamente l'importanza che oggi viene attribuita a questa misura.

Le specifiche tecniche di interoperabilità indicano poi limiti molto stringenti al parametro di sbilanciamento per ciascun asse delle forze verticali proprio perché numerosi studi hanno evidenziato l'importanza che questo parametro ha avuto nel caso di svio.

La disponibilità sul mercato di strumentazione adeguata e certificata EN 15654-2 potrà indurre un incremento della frequenza con cui effettuare le misure di peso così da introdurre interventi *on condition* ed ottenere miglioramenti ai processi manutentivi.

Le problematiche di usura connesse all'interazione meccanica fra la ruota e la rotaia sono complesse e molteplici e possono derivare sia dalla normale dinamica di marcia del veicolo ferroviario nelle varie condizioni di marcia sui diversi elementi di un tracciato e sia da difettosità degli elementi meccanici del veicolo e/o del binario. La disponibilità di strumenti di misura e diagnostici sempre più performanti e di facile utilizzo permettono di migliorare la manutenzione dei suddetti elementi meccanici e quindi di ridurre la possibile usura anomala.

The aim is to show that as the number of kilometres travelled increases, there is a greater increase in the wear of the most heavily loaded wheels and thus highlight that an imbalanced train requires more frequent maintenance activities.

8. Conclusions

The measurement of the weight force distribution exerted on the track under static conditions on each wheel of a bogie has diagnostic information content about suspension and geometric conditions. The uniform distribution of these forces has always been considered of great importance for railway vehicles running dynamic and thus for operational safety. The publication at the European level of the standard EN 15654-2, explicitly dedicated to the method of determining the distribution of vertical force under static conditions, precisely indicates the importance that is now addressed to this measurement. The technical specifications for interoperability indicate precisely very stringent limits to the vertical force imbalance parameter for each axis because numerous studies have shown the importance of this parameter in derailment accidents. The availability on the market of adequate and EN 15654-2-certified instrumentation may induce an increase in the weight measurements frequency, to introduce on-condition interventions and achieve improvements in maintenance processes.

The wear and tear problems connected to the mechanical wheel-rail interaction are complex and manifold and can arise both from the normal running dynamics of the railway vehicle in the various running conditions on the various elements of a track and from defects in the mechanical elements of the vehicle and/or the track. The availability of increasingly high-performance and user-friendly measuring and diagnostic tools makes it possible to improve the maintenance of these mechanical elements and thus reduce possible abnormal wear.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] STI LOC & PAS Specifica tecnica di interoperabilità per il sottosistema "Materiale rotabile - Locomotive e materiale rotabile per il trasporto di passeggeri" del sistema ferroviario dell'Unione europea- Regolamento (UE) N. 1302/2014 della Commissione del 18 novembre 2014.
- [2] STI WAG Specifica tecnica di interoperabilità per il sottosistema «materiale rotabile - carri merci» del sistema ferroviario nell'Unione europea - Regolamento (UE) N. 321/2013 della Commissione del 13 marzo 2013.
- [3] Regolamento Di Esecuzione (UE) 2019/776 Della Commissione del 16 maggio 2019 che modifica i regolamenti (UE) n. 321/2013, (UE) n. 1299/2014, (UE) n. 1301/2014, (UE) n. 1302/2014, (UE) n. 1303/2014 e (UE) 2016/919 della Commissione e la decisione di esecuzione 2011/665/UE della Commissione per quanto riguarda l'allineamento alla direttiva (UE) 2016/797 del Parlamento europeo e del Consiglio e l'attuazione di obiettivi specifici stabiliti nella decisione delegata (UE) 2017/1474 della Commissione Direttiva 2009/23/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 23 aprile 2009 relativa agli strumenti per pesare a funzionamento non automatico (Versione codificata direttiva 90/384/CEE).
- [4] CEI EN 50215:2011-03 - "Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane" - Materiale rotabile - Prove del materiale rotabile dopo il completamento della costruzione e prima dell'entrata in servizio.
- [5] UNI EN 14363:2016 Railway applications - "Testing for the acceptance of running, characteristics of railway vehicles - Testing of running behaviour and stationary tests" (Applicazioni ferroviarie - Prove per l'accettazione delle caratteristiche di marcia dei veicoli ferroviari - Prove di comportamento dinamico e statico).

- [6] UNI EN 14363:2019⁸ “*Railway applications - Testing for the acceptance of running, characteristics of railway vehicles - Testing of running behaviour and stationary tests*” (Applicazioni ferroviarie - Prove per l'accettazione delle caratteristiche di marcia dei veicoli ferroviari - Prove di comportamento dinamico e statico).
- [7] UNI EN 15654-2:2019 “*Railway applications - Measurement of vertical forces on wheels and wheelsets - Test in workshop for new, modified and maintained vehicles*” (Applicazioni ferroviarie - Misurazione delle forze verticali su ruote e sale montate - Parte 2: Prove in officina per veicoli nuovi, modificati e sottoposti a manutenzione). (Parte - 1 pesatura di un rotabile in movimento; Parte - 3 indicazioni su come tarare gli apparati per la misura dinamica).
- [8] EN 15528 “*Categorie delle linee per la gestione delle interfacce fra limiti di carico dei veicoli e l'infrastruttura*”.
- [9] RAIB (Railway Accident Investigation Branch), in UK, durante l'investigazione su un deragliamento avvenuto a Londra il 6 Maggio 2019
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/920957/R072020_200825_Willesden_High_Level_Junction.pdf.
- [10] UNI EN ISO 10012:2004 Sistemi di gestione della misurazione - Requisiti per i processi e le apparecchiature di misurazione.
- [11] UNI EN ISO 376:2011, Materiali metallici - Taratura degli strumenti di misurazione della forza utilizzati per la verifica delle macchine di prova uni assiali.
- [12] ISO 7500-1 Materiali metallici - Taratura e verifica delle macchine di prova statica uniassiale - Parte 1: Macchine di prova a trazione/compressione - Taratura e verifica del sistema di misurazione della forza.
- [13] ITALCERTIFER - Valutazione della conformità ai requisiti delle Norme EN 15654-2:2019 e EN 50215:2011 del sistema portatile per la misura del carico verticale denominato POWERVE - Rapporto di Valutazione - ITCF-C19222-11-ATF-RA-0001.
- [14] JARDINE A.K., LIN D. and BANJEVIC D. (2006), “*A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance.*” Mechanical systems and signal processing, 20.
- [15] MEI T.X., DING X.J. (2009), “*Condition monitoring of rail vehicle suspensions based on changes in system dynamic interactions.*” Vehicle System Dynamics, Vol. 47, Issue 9, pp. 1167-1181.
- [16] IWNICKI S. (1998), “*Manchester benchmarks for rail vehicle simulation.*” Vehicle System Dynamics, Vol. 30, Issues 3-4, 1998, pp. 295-313.
- [17] JENDEL T. (2002), “*Prediction of Wheel Profile Wear - Comparisons with Field Measurements,*” Wear, 253, pp. 89-99, 2002.
- [18] RAMALHO A., MIRANDA J. (2006), “*The Relationship between Wear and Dissipated Energy in Sliding Systems,*” Wear, 260, pp. 361-367.
- [19] ACCATTATIS F.M.D., BRUNER M., CATENA M., CORAZZA G.R., COSCIOTTI E., MALAVASI G., ROSSI S., TESTA M. (2014), “*Measurement of the vertical loads transferred to the rail,*” Ingegneria Ferroviaria, 69 (12), pp. 1001-1012.
- [20] <https://www.mariniimpianti.it/smcv-sistema-di-misura-carichi-verticali/>.

⁸ L'organismo UNI italiano ha adottato la norma in lingua inglese.

⁸ The Italian National Unification Body (UNI) has adopted the English language for regulatory text.