



Valutazione della robustezza di un sistema di misura ferroviario mediante tecniche di “Progettazione al Calcolatore degli Esperimenti”

Evaluation of the robustness of a railway measurement system by means of “Design of Computer Experiments” techniques

Daniele CORTIS ^(*)
Gabriele MALAVASI ^(**)

Sommario - Nell'esercizio ferroviario, i dati forniti dai sistemi di misura installati lungo linea possono essere utili per molte ragioni come la sicurezza e la manutenzione. Ad esempio, i sistemi di misura delle forze di contatto ruota-rotaia consentono il monitoraggio di qualsiasi tipologia di materiale rotabile in condizioni operative specifiche, come curve a bassa velocità o tratte tortuose, che sono sempre presenti nelle stazioni, in depositi ed impianti di smistamento. Per tale motivo, in questo articolo presentiamo la valutazione della robustezza del sistema di misura lungo linea SMCT. Il sistema si basa su una particolare configurazione di estensimetri posizionati sulla suola della rotaia, in grado di isolare gli effetti della forza laterale da quelli di quella verticale e di registrare la forza laterale utilizzando un coefficiente proporzionale tra la forza stessa e le deformazioni. Scopo del lavoro è costruire un modello di regressione adattivo in grado di prevedere il valore del rapporto tra la forza laterale e le deformazioni al fine di testare la robustezza del metodo di misura e il suo campo di funzionamento, modificando parametri che sperimentalmente possono essere cambiati.

1. Introduzione

Le applicazioni sperimentali [1] mostrano come una rotaia strumentata possa essere utilizzata come dispositivo di misura per valutare le forze di contatto ruota-rotaia. La maggior parte di questi studi si basa sulla misura delle deformazioni sulla superficie della rotaia e sulla valutazione del suo stato di sollecitazione. In letteratura, la misura della forza di contatto verticale (Q) è ben sviluppata e ci sono più soluzioni installate sulla rete ferroviaria [2]. Viceversa, la misura della forza di contatto laterale (Y) è poco diffusa. In questo caso, il problema princi-

Summary - In railway operations, data provided by wayside measuring systems could be useful for many reasons as ensuring safety and facilitating maintenance of the tracks. For example, measuring devices of wheel-rail contact forces allow the monitoring of any kind of rolling stock under specific operating conditions, like curves at low speed or twisted tracks, which are always present in stations, depots and marshalling yards. For that reason, in this paper we present the evaluation of the robustness of the SMCT wayside measurement system. The system is based on a particular strain gauges configuration on the rail foot, able to isolate the effects of the lateral force from those of the vertical one and record the lateral force using a proportional coefficient between that force and strains. The system has been validated with several field tests directly on a railway line in service: about 4000 transit and different types of trains, up to 110 km/h. The aim of the work is to build a fitting regression model able to predict the value of the ratio between the lateral force and strains in order to test the robustness of the measurement method and its operating range, modifying parameters that experimentally could not have been changed.

1. Introduction

Experimental applications [1] show how an instrumented rail can be used as measuring device to evaluate wheel-rail contact forces. Most of these studies were based on the measurement of deformations on the rail surface and the evaluation of the rail stress state. In literature, the measure of the wheel-rail vertical contact force (Q) is well developed and there are more than one installed solutions on a railway network [2]. On the other hand, the measurement of the wheel-rail lateral contact force (Y) is uncom-

^(*) Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Sapienza Università di Roma.

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

^(*) Civil, Buildings and Environmental Eng. Dpt., Sapienza University of Rome.

^(**) Civil, Buildings and Environmental Eng. Dpt., Sapienza University of Rome, a.r.

pale è il disaccoppiamento degli effetti della forza verticale da quelli della forza laterale.

Tuttavia, durante i primi decenni del secolo scorso, la letteratura ha proposto alcune soluzioni interessanti per superare questa mancanza. Ad esempio, MILKOVIĆ et al. [3] hanno suggerito un metodo basato sul “Blind Signal Separation” (BSS) utilizzando il metodo di “Independent Component Analysis” (ICA), ma i risultati ottenuti sono stati fortemente influenzati dalla dipendenza non lineare tra le coordinate dei punti di contatto della ruota sulla rotaia e la geometria stessa del profilo. Questa dipendenza cambia durante la progressiva usura del fungo riducendo la precisione della misura. BRACCIALI et al. [4] hanno invece proposto un nuovo sensore situato all'interno di un foro praticato in corrispondenza dell'asse neutro orizzontale del binario. Questa soluzione ha cercato di misurare separatamente le componenti delle forze. Il problema principale che ha riscontrato questo metodo è stata la bassa sensibilità di misura per i carichi laterali. DELPRETE et al. [5] hanno proposto una soluzione simile, sviluppando un semplice trasduttore per misurare, allo stesso tempo, la forza verticale e laterale. Anche in questo caso il sensore si trova in un foro del gambo della rotaia, però vicino al centro di torsione di taglio. Purtroppo, le coordinate di questo punto e le relative misure dipendono dalla geometria del tipo di rotaia.

Tuttavia, negli ultimi anni sono stati fatti nuovi interessanti studi a riguardo. Partendo dalla ricerca di CORTIS et al. [6], F. YU e M.T. HENDRY [7] hanno suggerito una nuova configurazione estensimetrica per disaccoppiare i segnali di deformazione della forza di contatto laterale dalle misure, analizzando le deformazioni flessionali sul gambo della rotaia mediante un ponte intero di Wheatstone. A tale scopo, hanno eseguito una modellazione ad elementi finiti del contatto ruota-rotaia per analizzare le deformazioni a flessione sull'anima e per ottimizzare le sezioni di misura. Anche W. ZHOU et al. [8] hanno proposto un nuovo metodo per misurare le grandezze e le posizioni delle forze di contatto laterali e verticali. Le formulazioni teoriche per il calcolo delle forze di contatto e delle loro posizioni sono derivate dai risultati di analisi degli elementi finiti. Tuttavia, nessuno dei lavori recenti è stato validato con test sul campo dedicati.

Nell'esercizio ferroviario, i dati forniti da diverse tipologie di sistemi di misura possono essere utili per molte ragioni come la sicurezza dell'esercizio e la manutenzione della geometria del binario senza dimenticare l'accuratezza della misura ([9] [10] [11]). La norma europea EN 14363 [12] ha stabilito il limite delle forze di contatto ruota-rotaia e la necessità di conoscere coefficiente di svio dei veicoli (Y/Q). A tal fine, i sistemi di misura lungo linea delle forze di contatto ruota-rotaia consentono il monitoraggio di qualsiasi tipologia di materiale rotabile (es. carri merci) in condizioni operative specifiche, come le curve a bassa velocità o tratte tortuose, le quali sono sempre presenti nelle stazioni, in depositi ed impianti di smistamento. Ad esempio, la possibilità di monitorare i

mon. In this case, the main issue is the decoupling of effects of the vertical force from those of the lateral one.

However, during the first decades of the century, literature proposes some interesting solution to overcome this lack of development. For example, MILKOVIĆ et al. [3] suggested a method based on “Blind Signal Separation” (BSS) using “Independent Component Analysis” (ICA), but results are strongly affected by the non-linear dependence between the coordinates of wheel-rail contact points and the geometry of the railhead profile. This dependency changes during the progressive wear of the railhead reducing the accuracy of the measurement. BRACCIALI et al. [4] proposed a new sensor located in a drilled hole in correspondence of the horizontal neutral axis of the rail. This solution tried to measure separately each force component. The principal issue of this method is the lower measurement sensitivity for the lateral loads. DELPRETE et al. [5] represent a similar smart solution. They developed a simple transducer for measuring, at the same time, vertical and lateral force. In this case too, the sensor is in a hole in the rail web, but close to the shear-torsion centre. Unfortunately, the coordinates of this point and the relative measures depend by the geometry of the rail type.

Nevertheless, in the last few years, new interesting studies has been made about it. Starting from the research of CORTIS et al. [6], F. YU and M. T. HENDRY [7] suggest a new strain gauge configuration to decouple strain signals of the wheel-rail lateral contact force from wayside measurements by analysing the bending strains on the rail web using a full Wheatstone bridge. For this purpose, they performed a finite element modelling of the wheel-rail contact to analyse the bending strains on the rail web and to optimize the measurement sections. Also W. ZHOU et al. [8] proposed a new wayside method to measure the magnitudes and positions of the lateral and vertical contact forces. Theoretical formulations for the contact forces and their positions are derived by the results of finite element analysis. Though, no one of the recently works has been validated with dedicated field tests.

In railway operation, the data provided by different types of measurement systems can be useful for many reasons such as operational safety and maintenance of the track geometry without forgetting the measurement accuracy ([9] [10] [11]). The European Standard EN 14363 [12], established the limit of wheel-rail contact forces and the need to know the vehicles derailment ratio (Y/Q). In fact, the wayside measuring devices of wheel-rail contact forces allow the monitoring of any kind of rolling stock (ex. freight wagons) under specific operating conditions, like curves at low speed or twisted tracks, which are always present in stations, depots and marshalling yards. For example, the opportunity to monitor the loads transmitted to the rails enables the Infrastructure Manager to report any non-conformity to the Railways Companies for corrective actions. For that reason, data provided by these measurement systems should be robust and reliable in order not to incur in incorrect evaluations.

carichi trasmessi alle rotaie consentirebbe al Gestore dell'Infrastruttura di segnalare eventuali non conformità alle Compagnie Ferrovie per l'applicazione di azioni correttive. Per questo motivo, i dati forniti da questi sistemi di misura devono essere solidi e affidabili per non incorrere in errate valutazioni.

In questo articolo presentiamo la valutazione della robustezza del sistema di misura lungo linea SMCT. Il sistema è stato sviluppato da CORTIS et al. [13] e si basa su una particolare configurazione di estensimetri sulla suola della rotaia, in grado di isolare gli effetti della forza laterale da quelli della verticale e registrare tale forza utilizzando un coefficiente di proporzionalità (K) tra essa e deformazione (ϵ). Il sistema, a differenza degli altri sopra citati, è stato validato con prove in campo direttamente su una linea ferroviaria in servizio: circa 4000 transiti e diverse tipologie di treni, da passeggeri (pendolari ed alta velocità) a merci, con una velocità fino a oltre 110 km/h. Durante i test, il sistema SMCT è stato inoltre combinato con un sistema di misura della forza verticale (Q) lato linea [2] ed ha mostrato la possibilità di valutare il coefficiente di svio (Y/Q) per ogni treno transitato sul sito di misurazione. La ricerca è stata supportata dal Gestore delle Infrastrutture Italiano (RFI - Rete Ferroviaria Italiana).

La robustezza del sistema SMCT è stata valutata mediante tecniche di "Design of Experiments" e simulazioni agli elementi finiti, sviluppando un modello di regressione adattivo in grado di determinare i principali effetti di alcuni parametri sulle misure di deformazione della suola della rotaia. Lo scopo del lavoro è stato quello di costruire un modello di regressione in grado di prevedere il valore del rapporto (K) tra la forza laterale e le deformazioni (ϵ) al fine di testare la robustezza del metodo di misura e il suo campo operativo, modificando parametri che sperimentalmente possono essere cambiati.

2. La Progettazione al Calcolatore degli Esperimenti

2.1. Fattori e Variabile di Risposta

Al giorno d'oggi, i metodi di progettazione sperimentale hanno trovato una vasta applicazione in molti settori scientifici e la sperimentazione guidata è uno dei modi principali per imparare a conoscere il funzionamento di un sistema o di un fenomeno fisico. Per questo motivo, condurre un esperimento fattorialmente è il modo migliore per distinguere gli effetti di diversi fattori. Questo metodo rappresenta una strategia sperimentale per variare i fattori congiuntamente, invece che uno alla volta. È possibile applicare questo tipo di tecniche di analisi anche agli esperimenti al computer, come le simulazioni agli elementi finiti, al fine di capire come alcuni parametri fisici sono correlati tra loro e come influenzano la risposta del sistema.

Considerando il settore ferroviario, questa tipologia di tecniche di analisi si può applicare a diversi sistemi, che

In this paper we present the evaluation of the robustness of the SMCT wayside measurement system. The system has been developed by CORTIS et al. [13] and it is based on a particular strain gauges configuration on the rail foot, able to isolate the effects of the lateral force from those of the vertical one and record the lateral force (Y) using a proportional coefficient (K) between force and strains (ϵ). The system, unlike the others mentioned above, has been validated with field tests directly on a railway line in service: about 4000 transit and different types of trains, from passenger (commuter and high speed) to freight and with a speed up to 110 km/h. During tests, the SMCT has been also combined with a wayside vertical force (Q) recorded system [2] showing the possibility to evaluate the derailment ratio (Y/Q) for each train passing over the measurement site. The research has been supported by the Italian Infrastructure Manager (RFI - Rete Ferroviaria Italiana).

The robustness of the SMCT system has been evaluated by means "Design of Experiments" techniques and finite element simulations, developing a fitting regression model able to determinate the main effects of selected parameters on the rail foot strains measures. The aim of the work is to build a fitting regression model able to predict the value of the ratio (K) between the lateral force and strains (ϵ) in order to test the robustness of the measurement method and its operating range, modifying parameters that experimentally could not have been changed.

2. Design of Computer Experiments

2.1. Factors and Response Variable

Nowadays, experimental design methods found a large application in many scientific sectors and the driven experimentation is one of the principal ways to learn how a system or a physical phenomenon works. For this reason, conduct a factorial experiment is the better way to distinguish the effects of several factors. This method represents an experimental strategy to change factors together, instead of one at a time. It is possible apply this kind of analysis techniques to Computer Experiments, like finite element simulations, in order to understand how some physical factors are related together and how they influence the response of the system.

Considering the railway sector, this type of techniques can be applied to different systems, as the monitoring of the infrastructure and its interaction with the vehicles, up to traffic management. For example, the availability of the system could be increased by studying the parameters that influence the wear of the contact line and their mutual interaction and evaluate as under certain conditions they lead to rapid wear of the track and to the loss of the nominal geometry.

In the following investigations, we focus the attention on some main factors, which affect the rail foot strain measures and we assess how they condition the response of the SMCT system. In particular, the following factors were chosen:

vanno dal monitoraggio dell'infrastruttura all'interazione con il veicolo, fino ad arrivare alla gestione della circolazione. Ad esempio, si potrebbe aumentare la disponibilità del sistema studiando i parametri che governano l'usura della linea di contatto e la loro mutua interazione e valutare i fattori che in certe condizioni portano ad una rapida usura del binario ed alla perdita della geometria nominale.

Nelle seguenti indagini, focalizzeremo l'attenzione su alcuni parametri principali, che influenzano le misure di deformazione della suola della rotaia e valuteremo come condizionano la risposta del sistema SMCT. In particolare, come fattori sono stati scelti:

- il valore della forza laterale (Y) e della forza verticale (Q), identificate dal loro rapporto (Y/Q);
- lo stato di usura della rotaia (S);
- la rigidità degli attacchi e del ballast (R).

Il gradiente termico e l'inclinazione del binario (1/20) sono stati esclusi dall'analisi in quanto il primo è compensabile dalla configurazione degli estensimetri ed il secondo è un parametro standard per la rete ferroviaria italiana e non cambia. Inoltre, lo stato di usura della rotaia (S), che in realtà è un parametro incontrollabile, per semplicità è stato valutato come controllabile definendo il suo valore in un determinato livello, come spiegato nel paragrafo successivo.

Come variabile di risposta, abbiamo assunto il rapporto (K) tra la forza di contatto laterale tra ruota e rotaia (Y) e la combinazione delle deformazioni registrate ($\sum \epsilon_i$). Grazie ai valori assunti dalla variabile di risposta, andremo a costruire un modello di regressione adattivo in grado di prevedere il suo valore in condizioni non sperimentabili.

2.2. Progettazione degli esperimenti

Gli esperimenti che coinvolgono diversi fattori e variabili vengono solitamente studiati mediante piani fattoriali. Il piano fattoriale più importante ed utilizzato è quello a n fattori ciascuno dei quali a due livelli. Una replica completa di questo tipo di piano sperimentale richiede 2^n osservazioni. La scelta dei livelli può essere quantitativa e/o qualitativa. Poiché ogni fattore ha solo due livelli, è possibile presumere che la risposta del sistema sia approssimativamente lineare nell'intervallo scelto.

Sulla base delle scelte precedenti, è stato adottato il piano fattoriale 2^3 ($n = 3$) che, come mostrato dalla Tab. 1, produce otto combinazioni differenti. Usando la notazione più (+) e meno (–) si sono indicati i livelli estremi, alto e basso, di ogni fattore. Nel piano fattoriale 2^3 , ci sono sette gradi di libertà; tre sono legati ai fattori principali (A, B e C) e quattro alle interazioni tra fattori (AB, BC, AC e ABC). In questo modo sarà possibile esprimere i risultati delle simulazioni attraverso un modello di regressione.

- the magnitude of the lateral (Y) and the vertical (Q) force, identified by their ratio (Y/Q);
- the wear status of the rail (S);
- the stiffness of the fastenings and ballast (R).

Thermal gradient and inclination of the rail (1/20) has been excluded from the analysis because of the first is possible to compensate by the strain gauges configuration, and secondly is a standard parameter for the Italian railway network and does not change. Furthermore, the state of wear of the rail (S), which is an uncontrollable factor, for simplicity has been evaluated as controllable by defining its value to a specific level as explained in the next paragraph.

As response variable, we assumed the ratio (K) between the wheel-rail lateral contact force (Y) and the combination of the recorded strains ($\sum \epsilon_i$). Thanks to the values assumed by the response variable, we are going to build a fitting regression model able to predict its value in conditions that cannot be tested.

2.2. Experimental Design

Experiments that involve several factors and variables are usually investigated by factorial designs. The most important and used factorial design is that of n factors each at two levels. A complete replication of this type of experimental design requires 2^n observations. The choice of levels may be quantitative and/or qualitative. Since each factor has only two levels, it is required that the response of the system is approximately linear over the chosen range.

Based on the previous choices, the 2^3 factorial design ($n = 3$) was adopted and as showed in the matrix design of Table 1, it produces eight sets of combinations. Using the plus (+) and minus (–) notation the extreme levels, high and low, of each factor were indicated. In the 2^3 factorial design, there are seven degrees of freedom; three are related to the main factors (A, B and C) and four to the interactions between factors (AB, BC, AC and ABC). In this way, it will be possible to express the results of simulations in terms of a regression model.

Furthermore, the factorial design can also be visualized geometrically as a cube, where each vertex is an experimental run (Fig. 1). The geometric view is useful to visualize the domain of the factors and to understand if that domain can capture the possible presence of non-linearity.

Considering our study, we obtain the design matrix reported in Tab. 2. The range of the derailment ratio (Y/Q) has the limits imposed by the European Standard EN 14363 [12]. In order to realize these conditions in the finite element simulations, the wheel-rail contact forces were settled as reported in the Tab. 2. In this case, we are not interested in the absolute value of the forces, but we focus on their mutual interaction analysing the effects of the ratio between them. The wear status of the rail (S) was considered with the same conditions as in BRUNER et al. [14], where a new rail profile (UIC60/60E1-New) and a worn

Inoltre, il piano fattoriale può essere visualizzato anche geometricamente come un cubo, in cui ogni vertice rappresenta una prova sperimentale (Fig. 1). La vista geometrica è utile per visualizzare il dominio dei fattori e per capire se quel particolare dominio è in grado di catturare l'eventuale presenza di non linearità.

Considerando il nostro studio, abbiamo ottenuto la matrice di progetto riportata in Tab. 2. I limiti del coefficiente di svio (Y/Q) sono imposti dalla Norma Europea EN 14363 [12]. Per realizzare queste condizioni nelle simulazioni agli elementi finiti, le forze di contatto ruota-rotaia sono state scelte come riportato in Tab. 2. In tale contesto, non siamo interessati al valore assoluto delle forze, ma ci concentriamo sulla loro mutua interazione analizzando gli effetti del loro rapporto. Lo stato di usura del binario (S) è stato preso in considerazione usando le stesse condizioni esposte in BRUNER et al. [14], in cui è stato studiato un profilo nuovo (UIC60 / 60E1-New) e un profilo usurato (UIC60 / 60E1-Worn) per una rotaia esterna di una generica curva (Fig. 2). Nel piano fattoriale, il profilo nuovo è stato considerato come livello basso (-), mentre il profilo usurato è stato considerato come livello alto (+).

La rigidità degli attacchi e del ballast (R) è stata definita assumendo un modello vibrazionale in cui la rigidità verticale è rappresentata da molle in serie. La rigidità massima è stata fissata a 150 MN/m, mentre quella minima a 50 MN/m. Il primo valore corrisponde ad una flessione verticale della rotaia di circa 1 mm ogni 150 kN di forza verticale, mentre il secondo di circa 1 mm ogni 50 kN di forza verticale (nessuno smorzamento è stato considerato).

Infine, come variabile di risposta è stato assunto il rapporto tra la forza di contatto laterale e la somma delle deformazioni della suola ($K_n = Y / \sum \varepsilon_i$).

3. Simulazioni agli elementi finiti

3.1. Modello agli Elementi Finiti

Un segmento di rotaia lungo un metro (UIC60 / 60E1) è stato discretizzato con elementi esaedrici 3D. La dimensione degli elementi è variabile lungo il segmento, da 15 mm a 5 mm. La rotaia è stata considerata compresa tra due traverse distanziate di 600 mm l'una dall'altra. Per ottimizzare la soluzione numerica, la *mesh* è stata rifinita nella sezione centrale del segmento dove sono rilevate le deformazioni della suola. Inoltre, in quest'area gli elementi esaedrici sono stati ricoperti con elementi guscio 2D (Fig. 3). Gli elementi guscio sono stati incollati a quelli sottostanti. Questa tec-

Tabella 1 – Table 1

Piano fattoriale 2^3 – Matrice di progetto
The 2^3 factorial design – Design matrix

Prove Tests n.	Fattori codificati Coded Factors		
	A	B	C
1	-	-	-
2	-	-	+
3	-	+	-
4	-	+	+
5	+	-	-
6	+	-	+
7	+	+	-
8	+	+	+

profile (UIC60/60E1-Worn) for an outer rail of a generic curve (Fig. 2) were considered. In the design matrix, the new rail profile was set as the low level (-), while the worn rail profile was set as the high level (+).

The stiffnesses of the fastenings and ballast (R) were chosen assuming a vibrational model in which vertical stiffness is modelled as a series of springs. The maximum stiffness was set at 150 MN/m, while the minimum at 50 MN/m. The first value corresponds to a vertical deflection of the rail of about 1 mm per 150 kN, while the second one of about 1 mm per 50 kN (no damping was considered).

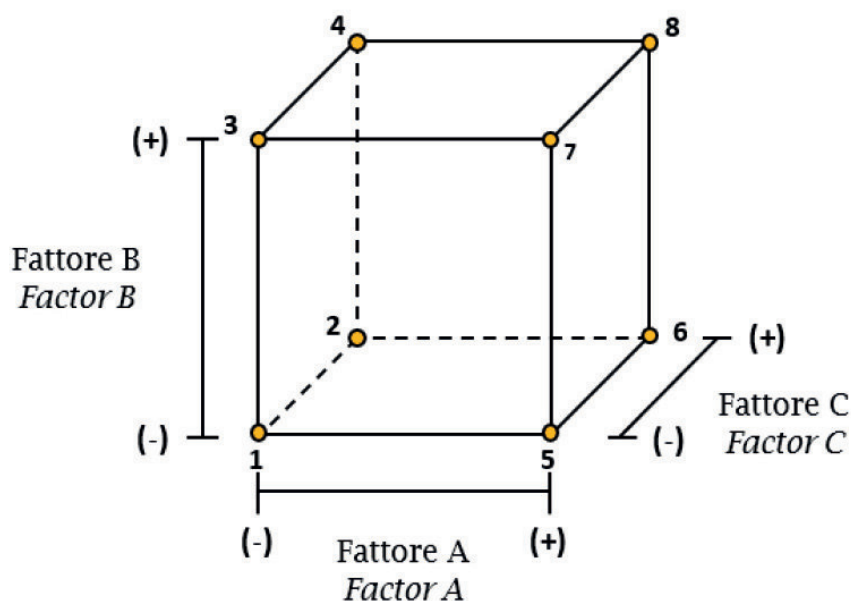


Figura 1 – Piano fattoriale 2^3 – Vista geometrica.
Figure 1 – The 2^3 factorial design – Geometric view.

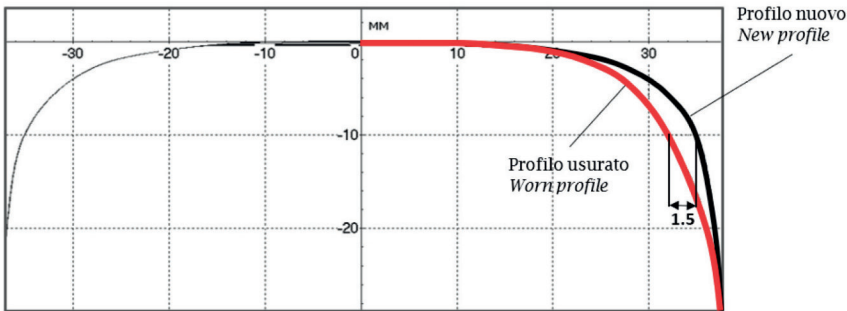


Figura 2 – Profilo nuovo ed usurato per una rotaia esterna in curva.
Figure 2 – New and worn rail profile for an outer rail in curving.

nica di modellazione è utile per confrontare correttamente i risultati delle simulazioni agli elementi finiti con le deformazioni misurate sperimentalmente utilizzando estensimetri elettrici a resistenza.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, sono stati utilizzati elementi molla-smorzatore per il collegamento del modello al terreno (dimensione degli elementi di 1 mm). Essi rappresentano la rigidità equivalente (Tab. 3) dovuta agli attacchi ed al ballast. I nodi inferiori di questi elementi sono stati collegati al terreno con vincoli fissi, mentre i nodi superiori sono stati vincolati al solo spostamento trasversale dovuto alla forza laterale (Y). Le estremità della rotaia sono libere di muoversi.

Matrice degli esperimenti al computer
Matrix of computer experiments

Prove Tests n.	Carichi applicati Applied Loads		Fattori codificati Coded Factors			Variabile di risposta Response variable
	Forza Y Force Y	Forza Q Force Q	Y/Q	S	R	$K_n = Y / \sum \epsilon_i$
	[kN]	[kN]	/	/	[MN/m]	[kN/ $\mu\epsilon$]
1	10	100	0.1	Nuovo New	50	K_1
2	10	100	0.1	Nuovo New	150	K_2
3	10	100	0.1	Usurato Worn	50	K_3
4	10	100	0.1	Usurato Worn	150	K_4
5	120	100	1.2	Nuovo New	50	K_5
6	120	100	1.2	Nuovo New	150	K_6
7	120	100	1.2	Usurato Worn	50	K_7
8	120	100	1.2	Usurato Worn	150	K_8

Eventually, the response variable has been taken as the ratio between the wheel-rail lateral contact force and the sum of the rail foot strains ($K_n = Y / \sum \epsilon_i$).

3. Finite Element Simulations

3.1. Finite Element Model

A one-meter-long segment of rail (UIC60/60E1 new and worn profile) was meshed with 3D hexahedral elements. The size of elements changes along the segment, from 15 mm to 5 mm. The rail was supported by two sleepers with a spacing of 600 mm. In order to optimize the numerical solution, the mesh has been refined in the mid-section of the rail where the strains are measured. Furthermore, in this area the hexahedral elements were covered with 2D shell elements (Fig. 3). The shell elements were glued with the underlying ones. This modelling technique is useful to correctly compare the finite element simulations results with the strains measured experimentally using electrical strain gauges.

Regarding the boundary conditions, spring-damper elements were used to connect the model to the ground (element size 1 mm). They represent the equivalent stiffness (Tab. 3) due to the elastic fastenings and the ballast. The lower nodes of these elements were connected to the ground with fixed constraints, while the upper nodes were fixed only for the cross displacement due to the lateral force (Y). The ends of the rail are free to move.

The contact forces were applied on the railhead in the mid-section of the segment [14] at points of Fig. 4 and 5 considering a wheelset running in curving with a radius of 300 m, a cant of 90 mm, a length 300 m with neutral speed (speed for which the resultant of the centrifugal force and of the weight force is perpendicular to the rolling plane). Only one contact point between wheel and rail was used for the new profile (Fig. 4), while two different points were used for the worn one, splitting the resultant of the forces (Fig. 5) [14]. The material used is a classic steel with a Young's modulus of 210 GPa and a Poisson's ratio of 0.3.

In the simulations, the rail foot strains combination ($\sum \epsilon_i$) was performed using the equation of the full Wheatstone bridge (1), where V_u is the

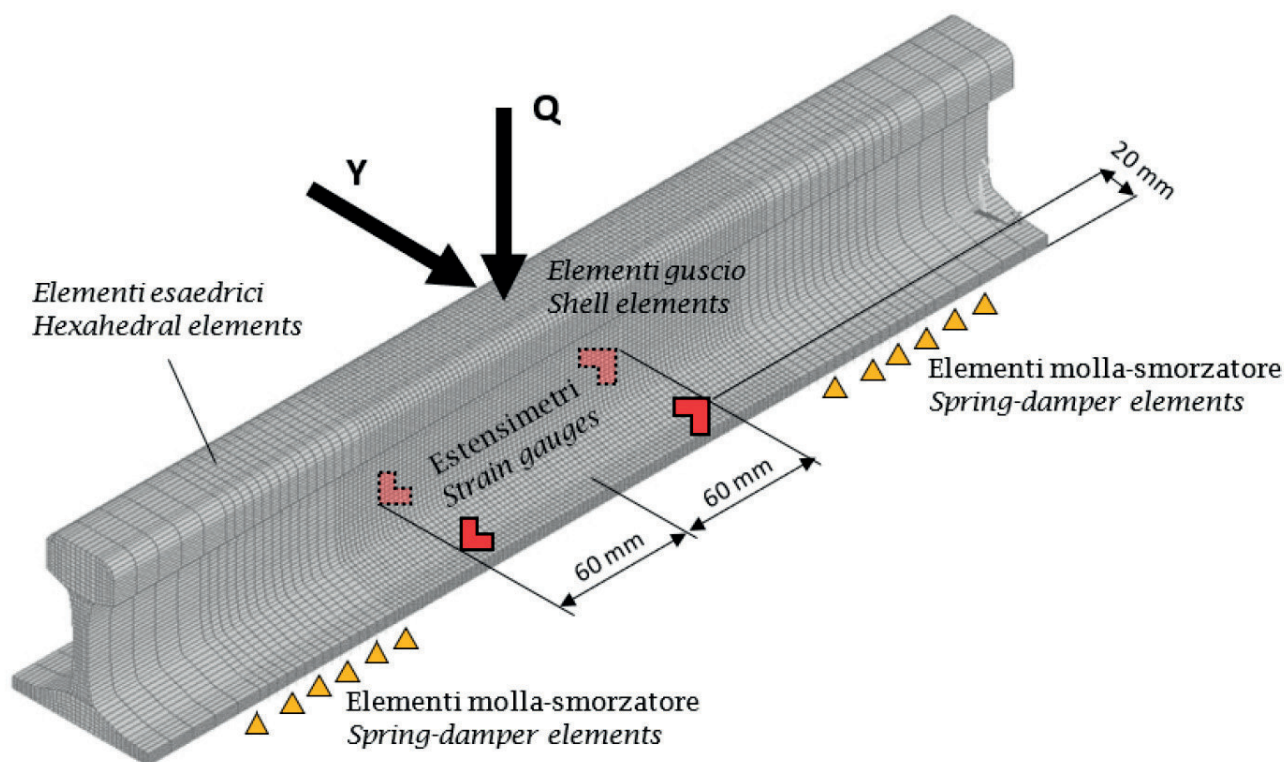


Figura 3 – Modello agli Elementi Finiti.
Figure 3 – Finite Element Model.

Le forze di contatto sono state applicate sulla testa della rotaia nei punti di Fig. 4 e Fig. 5 sempre in prossimità della sezione centrale del segmento [14] considerando una sala montata che percorre una curva di raggio 300 m, sopraelevazione 90 mm, lunghezza 300 m ad una velocità di equilibrio (velocità per la quale la risultante della forza centrifuga e della forza peso è perpendicolare al piano di rotolamento). Per il profilo nuovo è stato usato un solo punto di contatto tra ruota e rotaia (Fig. 4), mentre per il profilo usurato sono stati usati due punti di contatto diversi, suddividendo la risultante delle forze (Fig. 5) [14]. Il materiale utilizzato è un classico acciaio con un modulo di Young di 210 GPa e un coefficiente di Poisson di 0.3.

Nelle simulazioni, la combinazione delle deformazioni della suola ($\sum \epsilon_i$) è stata eseguita attraverso l'equazione del ponte intero di Wheatstone (1), dove V_U è la tensione di uscita, V_A la tensione di alimentazione, f il fattore di misura e ϵ_i le deformazioni.

$$\begin{aligned} \frac{V_U}{V_A} &= \frac{f}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \\ &= \frac{f}{4} \sum \epsilon_i \end{aligned} \quad (1)$$

Le deformazioni sono state registrate nei quattro punti come indicato dal metodo SMCT [13] per il posizionamen-

output voltage, V_A is the supply voltage, f is the gage factor and ϵ_i are the recorded strains.

$$\begin{aligned} \frac{V_U}{V_A} &= \frac{f}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \\ &= \frac{f}{4} \sum \epsilon_i \end{aligned} \quad (1)$$

The strains were recorded in the four points corresponding to the locations of the strain gauges according to the SMCT method [13]. The four points are symmetrically disposed respect the symmetry planes of the rail segment. The distance of the four strain gauges from the mid-section of the rail segment is ± 60 mm, whereas the distance from the rail foot edge is 20 mm (Fig. 3).

3.2. Results

Table 3 shows the results of the simulations. In the "Response variable" column, it is possible to see how the variable K and the rail foot strains combination ($\sum \epsilon_i$) remains almost constant with some boundary conditions. This result can be explained, for example, considering the linearity of the effects of some factors respect to the others: the linearity produces equal variations of the factors that do not modify the value of the response variable [13].

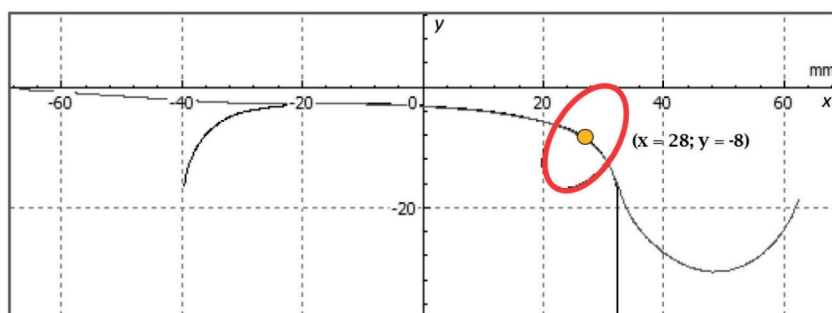


Figura 4 – Profilo nuovo – Un punto di contatto.
Figure 4 – New rail profile – One contact point.

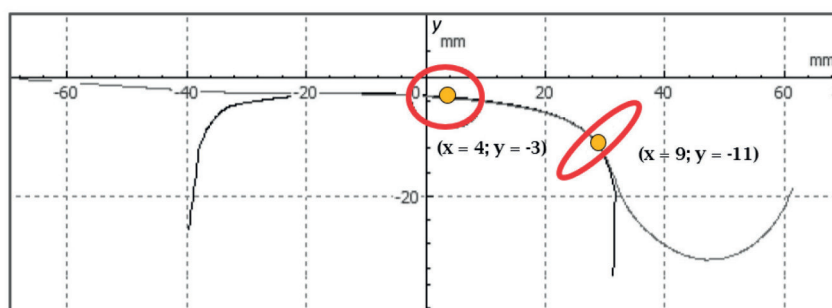


Figura 5 – Profilo usurato – Due punti di contatto.
Figure 5 – Worn rail profile – Two contact points.

to sperimentale degli estensimetri. I quattro punti sono disposti simmetricamente rispetto ai piani di simmetria del segmento di rotaia. La distanza dei quattro estensimetri dalla sezione centrale del segmento di rotaia è di ± 60 mm, mentre la distanza dal bordo esterno è di 20 mm (Fig. 3).

3.2. Risultati

La Tab. 3 mostra i risultati delle simulazioni. Nella colonna “Variabile di Risposta” è possibile vedere come il parametro K e la combinazione di deformazione della suola della rotaia ($\sum \epsilon_i$) rimangano pressoché costanti per alcune condizioni al contorno. Questo risultato può essere spiegato, ad esempio, con la linearità degli effetti di alcuni fattori rispetto ad altri: la linearità produce variazioni uguali dei fattori che non modificano il valore della variabile di risposta [13]. Grazie a questi risultati numerici, nel prossimo paragrafo focalizzeremo la nostra attenzione sugli effetti principali che i fattori hanno sul parametro K e sulla loro reciproca interazione. Successivamente sarà possibile costruire il modello di regressione utilizzando solamente le variabili significative.

4. Superficie di Risposta

4.1 Effetti principali e Interazione tra i Fattori

L'effetto di un singolo fattore è definito come la diffe-

Thanks to these numerical results, in the next paragraph we are going focus our attention on the main effects of the tested factors on the K parameter and their mutual interaction. Then, it will be possible to build the regression model using only the significant variables.

4. Response Surface

4.1. Main effects and Interaction between Factors

The effect of a single factor is defined as the difference between the values assumed by the response variable at different levels of the same factor. For example, referring to the Tab. 4, the effect of the Y/Q factor is the difference between the average response at the low level $\bar{m}(-)$ and the average response at the high level $\bar{m}(+)$. In this case, increasing the factor from the low level to the high level causes an average response increase. Considering the effects of all considered factors, we can assume as main effects on the response variable (K) the derailment ratio (Y/Q) and the wear status of the rail (S). In contrast, the stiffness of the fastenings and ballast (R) does not produce any changes on the average response, as showed by expressions (2 ÷ 4).

$$\overline{\Delta m}_{Y/Q} = \bar{m}_{Y/Q}(-) - \bar{m}_{Y/Q}(+) = \frac{K_1 + K_2 + K_3 + K_4}{4} - \quad (2)$$

$$- \frac{K_5 + K_6 + K_7 + K_8}{4} = 0.111$$

$$\overline{\Delta m}(S) = \bar{m}_S(-) - \bar{m}_S(+) = \frac{K_1 + K_2 + K_5 + K_6}{4} - \quad (3)$$

$$- \frac{K_3 + K_4 + K_7 + K_8}{4} = -0.116$$

$$\overline{\Delta m}(R) = \bar{m}_R(-) - \bar{m}_R(+) = \frac{K_1 + K_3 + K_5 + K_7}{4} - \quad (4)$$

$$- \frac{K_2 + K_4 + K_6 + K_8}{4} = 0.000$$

In some cases, the difference on the average response between the levels of one factor is not the same for all levels of the other factors. These situations mean that the different factors are interacting. Considering Tab. 4, we can see

Tabella 3 – Table 3

Risultati delle simulazioni agli elementi finiti
Results of the finite element simulations

Prove Tests n.	Carichi Applicati Applied Loads		Fattori codificati Coded Factors			Deformazioni Strains	Variabile di risposta Response variable
	Forza Y Force Y	Forza Q Force Q	Y/Q	S	R	$\sum \varepsilon_i$	$K_n = Y / \sum \varepsilon_i$
	[kN]	[kN]	/	/	[MN/m]	[$\mu\varepsilon$]	[kN/ $\mu\varepsilon$]
1	10	100	0.1	Nuovo New	50	47.6	0.210
2	10	100	0.1	Nuovo New	150	47.6	0.210
3	10	100	0.1	Usurato Worn	50	22.9	0.437
4	10	100	0.1	Usurato Worn	150	22.9	0.438
5	120	100	1.2	Nuovo New	50	571.6	0.210
6	120	100	1.2	Nuovo New	150	571.6	0.210
7	120	100	1.2	Usurato Worn	50	558.4	0.215
8	120	100	1.2	Usurato Worn	150	558.4	0.215

renza tra i valori assunti dalla variabile di risposta a diversi livelli dello stesso fattore. Ad esempio, facendo riferimento alla Tab. 4, l'effetto del fattore Y/Q è la differenza tra la risposta media al livello basso $\bar{m}(-)$ e la risposta media al livello alto $\bar{m}(+)$. In questo caso, l'aumento del fattore dal livello basso al livello alto provoca un aumento della risposta media. Tenendo conto degli effetti di tutti i fattori considerati, possiamo assumere come effetti principali sulla variabile di risposta (K) il coefficiente di svio (Y/Q) e lo stato di usura della rotaia (S). La rigidità degli attacchi e del ballast (R) non produce invece variazioni nella risposta media, come mostrato dalle espressioni (2 ÷ 4).

$$\begin{aligned} \bar{\Delta m}_{Y/Q} = \bar{m}_{Y/Q}(-) - \bar{m}_{Y/Q}(+) &= \frac{K_1 + K_2 + K_3 + K_4}{4} - \\ &- \frac{K_5 + K_6 + K_7 + K_8}{4} = 0.111 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \bar{\Delta m}(S) = \bar{m}_S(-) - \bar{m}_S(+) &= \frac{K_1 + K_2 + K_5 + K_6}{4} - \\ &- \frac{K_3 + K_4 + K_7 + K_8}{4} = -0.116 \end{aligned} \quad (3)$$

that the effects of Y/Q factor depend on the level of S factor and vice versa.

This result does not appear for the R factor. Consequently, the magnitude of the interaction may be evaluated by the average difference on the response variable. The analysis of the interactions of the main factors is also shown graphically in the following figures. The numerical data for Y/Q-S interaction are reported in Tab. 5. In the graphs, not parallel lines indicate an interaction between the factors (Fig. 6), while parallel lines show a lack of interaction between factors in their variation range (Fig. 7 and Fig. 8).

The next step of procedure is the significant test of the interaction between Y/Q factor and the wear status of the rail (S). The significance of an interaction can be evaluated by the analysis of the variance ($\sqrt{\sigma^2}$), as done before for the expressions (2 ÷ 4). Tab. 6 has the additional rows dedicated to this analysis. The table was built using the properties implied by the orthogonality of the matrix of the design of experiments [15]. Once the signs for the main effects were established, the signs for the remaining columns can be obtained by multiplying the appropriate preceding columns, row by row. For example, the signs in the Y/Q-S column are the product of the Y/Q and S columns signs in each row. The analysis of the variance of the Y/Q-S column proves that the interaction is highly significant. This result confirms that the Y/Q-S interaction must be considered in the regression model together the main effects.

$$\overline{\Delta m}(R) = \overline{m}_R(-) - \overline{m}_R(+) = \frac{K_1 + K_3 + K_5 + K_7}{4} - \frac{K_2 + K_4 + K_6 + K_8}{4} = 0.000 \quad (4)$$

In alcuni casi, la differenza della risposta media tra i livelli di un fattore non è la stessa per tutti i livelli degli altri fattori. Queste situazioni significano che si è verificata un'interazione tra i fattori. Considerando la Tab. 4, possiamo vedere che gli effetti del fattore Y/Q dipendono dal livello del fattore S e viceversa.

Questo risultato non appare per il fattore R. Di conseguenza, l'entità dell'interazione può essere valutata dalla differenza media sulla variabile di risposta. L'analisi delle interazioni dei fattori principali è anche rappresentata graficamente nelle seguenti figure. I dati numerici per l'interazione Y/Q-S sono riportati nella Tab. 5. Nei grafici, il caso di linee non parallele indica un'interazione tra i fattori (Fig. 6), mentre le linee parallele mostrano l'assenza di interazione tra i fattori nel loro intervallo di variazione (Fig. 7 e Fig. 8).

Il passaggio successivo è il test della significatività dell'interazione tra il fattore Y/Q e lo stato di usura della rotaia (S). La significatività di un'interazione può essere valutata mediante l'analisi della varianza ($\sqrt{\sigma^2}$) come fatto in precedenza per le espressioni (2 ÷ 4). La Tab. 6 presenta delle colonne aggiuntive dedicate a questa analisi. La tabella è stata costruita utilizzando le proprietà implicite nell'ortogonalità della matrice nella progettazione degli esperimenti [15]. Una volta stabiliti i segni per gli effetti principali, i segni per le colonne rimanenti possono essere ottenuti moltiplicando riga per riga le opportune colonne precedenti. Ad esempio, i segni nella colonna Y/Q-S sono il prodotto dei segni delle colonne Y/Q e S in

Tabella 4 – Table 4

Effetti principali dei fattori
Main effects of the factors

Prove Tests n.	Fattori codificati Coded Factors			Variabile di risposta Response variable
	Y/Q	S	R	$K_n = Y/\sum \epsilon_i$
1	–	–	–	0.210
2	–	–	+	0.210
3	–	+	–	0.437
4	–	+	+	0.438
5	+	–	–	0.210
6	+	–	+	0.210
7	+	+	–	0.215
8	+	+	+	0.215
$\overline{m}(-)$	0.324	0.210	0.268	
$\overline{m}(+)$	0.212	0.326	0.268	
$\Delta \overline{m}$	0.111	-0.116	0.000	

Tabella 5 – Table 5

Interazione Y/Q-S
Y/Q-S Interaction

	$\overline{S}(-)$	$\overline{S}(+)$
$\overline{Y/Q}(-)$	$\frac{K_1 + K_2}{2} = 0.210$	$\frac{K_3 + K_4}{2} = 0.437$
$\overline{Y/Q}(+)$	$\frac{K_5 + K_6}{2} = 0.210$	$\frac{K_7 + K_8}{2} = 0.215$

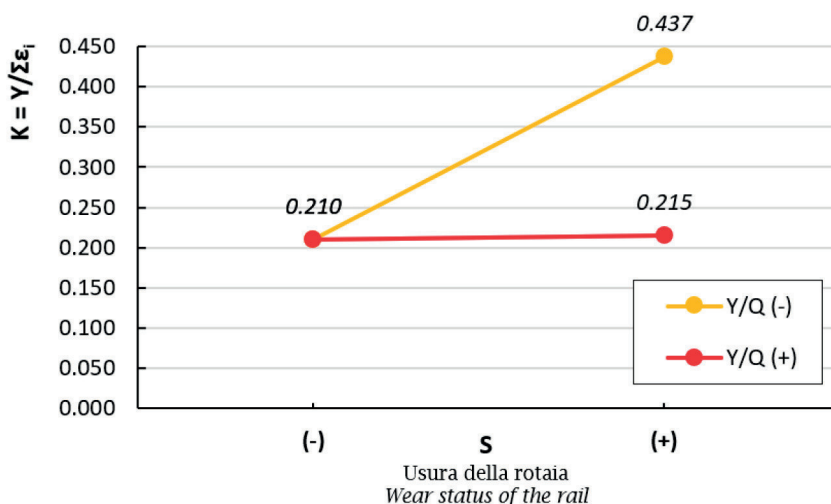


Figura 6 – Interazione Y/Q-S.
Figure 6 – Y/Q-S Interaction.

4.2. Linear Regression Model

Thanks to a 2ⁿ factorial design, it is possible to express the results of simulations in terms of a regression model. A typical linear regression model is represented by the following expression:

$$f = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \sum \beta_{ij} x_i x_j + e \quad (5)$$

where x_i are the coded variables, $x_i x_j$ the mutual interactions, β_i the regression coefficients and e the error term. Usually, the method of least squares is used to estimate the parameters of the approximating polynomial. According to the results of the previous section,

ogni riga. L'analisi della varianza della colonna Y/Q-S dimostra che l'interazione è altamente significativa. Questo risultato conferma che l'interazione Y/Q-S deve essere considerata nel modello di regressione insieme agli effetti principali.

4.2. Modello di regressione lineare

Grazie al piano fattoriale 2ⁿ è possibile esprimere i risultati delle simulazioni con un modello di regressione. Un tipico modello lineare è rappresentato dalla seguente espressione:

$$f = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \sum \beta_{ij} x_i x_j + e \quad (5)$$

dove x_i sono le variabili codificate $x_i x_j$ le interazioni reciproche, β_i i coefficienti di regressione ed e il termine di errore. Di solito, per stimare i parametri del polinomio approssimativo viene utilizzato il metodo dei minimi quadrati. In base ai risultati del paragrafo precedente, possiamo assumere come polinomio approssimativo la seguente espressione (6), in cui sono state considerate due variabili principali e la loro mutua interazione.

$$f(x_1; x_2) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + e \quad (6)$$

Le variabili x_1 e x_2 corrispondono ai fattori Y/Q ed S, mentre $x_1 x_2$ rappresenta l'interazione. Il fattore R non è stato considerato perché non ha influenza sulla risposta. Per i piani fattoriali a due livelli, la linearità perfetta non è necessaria perché il sistema funziona sufficientemente bene anche quando l'ipotesi di linearità è approssimativa. Infatti, sommando i termini di interazione, abbiamo un modello in grado di rappresentare una certa curvatura nella variabile di risposta [15].

Considerando i risultati della Tab. 4 e gli intervalli di variazione dei fattori, è stato costruito il seguente modello di regressione lineare (7).

$$f(Y/Q; S) = 0.334 - 0.101(Y/Q) + 0.124(S) - 0.101(Y/Q)(S) \quad (7)$$

Il valore del fattore R è stato fissato al livello alto (+) a causa della sua scarsa influenza sulla variabile di risposta.

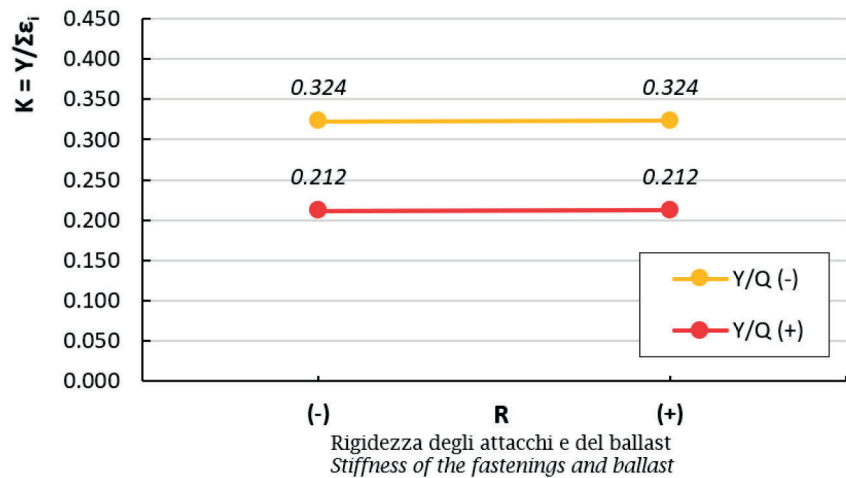


Figura 7 – Interazione Y/Q-R.
Figure 7 – Y/Q-R Interaction.

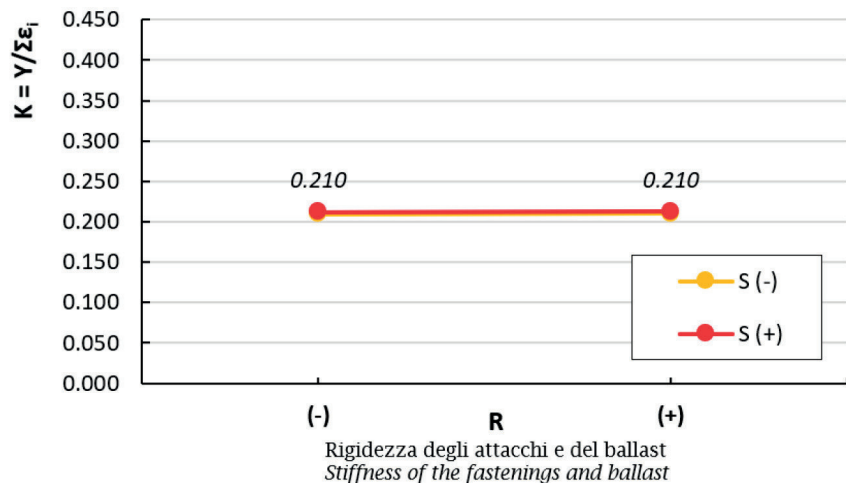


Figura 8 – Interazione S-R.
Figure 8 – S-R Interaction.

we can assume as approximating polynomial the following expression (6), in which two main variables and their mutual interaction were considered.

$$f(x_1; x_2) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + e \quad (6)$$

The variables x_1 and x_2 correspond to the factors Y/Q and S, while $x_1 x_2$ represents the interaction. The R factor has not been considered because it has no influence on the response. For two-level factorial designs, perfect linearity is unnecessary because the system works quite well even when the linearity assumption is very approximately. In fact, adding the interaction terms, we have a model capable of representing some curvature in the response variable [15].

Tabella 6 – Table 6

Significatività delle interazioni tra fattori
Significance of the interactions between factors

Prove Tests n.	Fattori codificati ed Interazioni Coded Factors and Interactions							Variabile di risposta Response variable
	Y/Q	S	Y/Q-S	R	Y/Q-R	R-S	Y/Q-R-S	$K_n = Y/\sum \varepsilon_i$
1	–	–	+	–	+	+	–	0.210
2	–	–	+	+	–	–	+	0.210
3	–	+	–	–	+	–	+	0.437
4	–	+	–	+	+	+	–	0.438
5	+	–	–	–	–	+	+	0.210
6	+	–	–	+	+	–	–	0.210
7	+	+	+	–	–	–	–	0.215
8	+	+	+	+	–	+	+	0.215
$\bar{\sigma} (-)$	0.131	0.000	0.131	0.113	0.113	0.113	0.113	
$\bar{\sigma} (+)$	0.003	0.129	0.003	0.113	0.113	0.113	0.113	
$\Delta\bar{\sigma}$	0.128	-0.128	0.129	0.000	0.000	0.000	0.000	

Se il valore del fattore R fosse impostato sul livello basso (–), non verrebbe mostrato alcun cambiamento rilevante.

Al fine di verificare l'efficienza del modello, abbiamo eseguito due ulteriori simulazioni aggiungendo due punti centrali al disegno sperimentale 2³ (Tab. 7). I fattori Y/Q ed R sono stati impostati al valore medio del campo di variazione, mentre lo stato di usura della rotaia (S) è stato impostato rispettivamente come profilo “nuovo” e “usurato”.

Nella Tab. 8 abbiamo riportato i risultati del modello di regressione con i relativi errori. I risultati confermano che il polinomio non è in grado di adattarsi adeguatamente a uno dei punti centrali, a causa della forte non linearità della variabile di risposta. L'errore è di circa il 50%.

Per diminuire questo effetto di non linearità sulla variabile di risposta, è stato ridotto il campo di variazione

Considering the results of Tab. 4 and the variation ranges of the factors, the following linear regression model was constructed (7).

$$f(Y/Q; S) = 0.334 - 0.101(Y/Q) + 0.124(S) - 0.101(Y/Q)(S) \quad (7)$$

The value of R factor was fixed to the high level (+) because of its non-influence on the response variable. If the value of the R factor were set to the low level (–), no relevant change would be shown.

In order to check the efficiency of the model, we performed two additional simulations adding two centre points to the 2³ experimental design (Tab. 7). The Y/Q and R factors were set into the middle value of the variation range, while the wear status of the rail (S) was set respectively like “new” and “worn” profile.

Tabella 7 – Table 7

Risultati delle simulazioni agli elementi finiti – Punti centrali
Results of the finite element simulations – Central points

Prove Tests n.	Carichi Applicati Applied Loads		Fattori codificati Coded Factors			Deformazioni Strains	Variabile di risposta Response variable
	Forza Y Force Y	Forza Q Force Q	Y/Q	S	R	$\sum \varepsilon_i$	$K_n = Y/\sum \varepsilon_i$
	[kN]	[kN]	/	/	[MN/m]	[$\mu\epsilon$]	[kN/ $\mu\epsilon$]
9	55	100	0.55	Nuovo New	100	262.0	0.210
10	55	100	0.55	Usurato Worn	100	241.9	0.227

Tabella 8 – Table 8

Risultati del modello di regressione
Results of the regression model

Prove Tests n.	Carichi Applicati Applied Loads			Variabile di risposta Response variable	Modello di regressione Regression Model	Errore Error
	Y/Q	S	R	$K_n = Y/\sum \varepsilon_i$	$f(Y/Q; S)$	e
	/	/	[MN/m]	[kN/ $\mu\epsilon$]	[kN/ $\mu\epsilon$]	%
1	0.1	Nuovo New	50	0.210	0.210	0.0
2	0.1	Nuovo New	150	0.210	0.210	0.0
3	0.1	Usurato Worn	50	0.437	0.437	0.0
4	0.1	Usurato Worn	150	0.438	0.438	0.0
5	1.2	Nuovo New	50	0.210	0.210	0.0
6	1.2	Nuovo New	150	0.210	0.210	0.0
7	1.2	Usurato Worn	50	0.215	0.215	0.0
8	1.2	Usurato Worn	150	0.215	0.215	0.0
9	0.55	Nuovo New	100	0.210	0.210	0.0
10	0.55	Usurato Worn	100	0.227	0.346	+ 52.4

del fattore Y/Q, aumentando il valore del livello basso, inizialmente a 0.2 e successivamente a 0.3. I risultati sulla variabile di risposta sono riportati nelle Tab. 9 e Tab. 10. Come è possibile vedere, il valore della risposta diminuisce proporzionalmente. Ciò significa che aumentando il limite inferiore del fattore Y/Q, la non linearità sulla risposta diminuisce.

Considerando i risultati della Tab. 10, è stato fissato il nuovo intervallo per il fattore Y/Q e abbiamo costruito un nuovo modello di regressione lineare (8).

$$f(Y/Q; S) = 0.236 - 0.019(Y/Q) + 0.026(S) - 0.019(Y/Q)(S) \quad (8)$$

La Tab. 11 mostra i risultati del nuovo polinomio di approssimazione con i relativi errori. In questo caso, il modello è in grado di adattarsi correttamente ai punti centrali. L'errore massimo è di circa il 5%. In conclusione, la Fig. 9 presenta la superficie di risposta e il grafico dei contorni ottenuti dal modello di regressione (8), assumendo che il fattore R sia al livello alto (+).

In Tab. 8, we reported the results of the regression model with the relative errors. The results confirm that the polynomial is unable to fit properly at one of the centre points, due to the strong non-linearity of the response variable. The error is about of 50%.

To decrease this non-linear effect on the response variable, the range of the Y/Q factor was reduced, increasing the low level, first to 0.2 and then to 0.3. The effect on the response variable is reported in Tab. 9 and Tab. 10. As it is possible to see, the value of response decreases proportionally. This means that by increasing the lower limit of Y/Q factor, the non-linearity of the response decreases.

Considering the results of Tab. 10, a new linear regression model for $0.3 \leq Y/Q \leq 1.2$ was designed (8).

$$f(Y/Q; S) = 0.236 - 0.019(Y/Q) + 0.026(S) - 0.019(Y/Q)(S) \quad (8)$$

Tab. 11 shows the results of the new approximating polynomial with the relative errors. In this case, the model is able to fit properly the centre points. The maximum error is

Tabella 9 – Table 9

Risultati delle simulazioni agli elementi finiti – $Y/Q \geq 0.2$
Results of the finite element simulations – $Y/Q \geq 0.2$

Prove Tests n.	Carichi Applicati <i>Applied Loads</i>		Fattori codificati <i>Coded Factors</i>			Deformazioni <i>Strains</i>	Variabile di risposta <i>Response variable</i>
	Forza Y <i>Force Y</i>	Forza Q <i>Force Q</i>	Y/Q	S	R	$\sum \varepsilon_i$	$K_n = Y / \sum \varepsilon_i$
	[kN]	[kN]	/	/	[MN/m]	[$\mu\varepsilon$]	[kN/ $\mu\varepsilon$]
1'	20	100	0.2	Nuovo <i>New</i>	50	93.5	0.210
2'	20	100	0.2	Nuovo <i>New</i>	150	93.5	0.210
3'	20	100	0.2	Usurato <i>Worn</i>	50	71.5	0.280
4'	20	100	0.2	Usurato <i>Worn</i>	150	71.5	0.280

4.3. Analisi della Robustezza

L'analisi delle interazioni tra fattori controllabili e non controllabili è il fulcro dell'analisi della robustezza. Pertanto, i modelli di previsione per la variabile di risposta dovrebbero includere entrambi i tipi di fattori e la loro reciproca interazione. Il vantaggio principale della progettazione degli esperimenti è la possibilità di considerare in un unico piano fattoriale i fattori incontrollabili come controllabili e metterli insieme ai fattori controllabili. Questo è ciò che viene proposto nel nostro piano fattoriale 2^3 considerando lo stato di usura della rotaia (S).

Grazie al modello di regressione lineare sviluppato (8), sono stati ottenuti importanti risultati sul metodo di misura SMCT [13] e sul suo intervallo operativo in condi-

about of 5%. In conclusion, Fig. 9 presents the response surface and the contour plot obtained from the regression model (8), assuming that the R factor is at the high level (+).

4.3. Robustness Analysis

The analysis of the interactions between controllable and uncontrollable factors is the core of the robust analysis. Therefore, prediction models for the response variable should include both kind of factors and their mutual interaction. The main advantage of the design of experiments approach is that it is possible consider in a single factorial design the uncontrollable factors as controllable and put them together with the controllable factors. This is what is

Tabella 10 – Table 10

Risultati delle simulazioni agli elementi finiti – $Y/Q \geq 0.3$
Results of the finite element simulations – $Y/Q \geq 0.3$

Prove Tests n.	Carichi Applicati <i>Applied Loads</i>		Fattori codificati <i>Coded Factors</i>			Deformazioni <i>Strains</i>	Variabile di risposta <i>Response variable</i>
	Forza Y <i>Force Y</i>	Forza Q <i>Force Q</i>	Y/Q	S	R	$\sum \varepsilon_i$	$K_n = Y / \sum \varepsilon_i$
	[kN]	[kN]	/	/	[MN/m]	[$\mu\varepsilon$]	[kN/ $\mu\varepsilon$]
1''	30	100	0.3	Nuovo <i>New</i>	50	142.9	0.210
2''	30	100	0.3	Nuovo <i>New</i>	150	142.9	0.210
3''	30	100	0.3	Usurato <i>Worn</i>	50	120.2	0.250
4''	30	100	0.3	Usurato <i>Worn</i>	150	120.2	0.250

Tabella 11 – Table 11

Risultati del modello di regressione – $Y/Q \geq 0.3$
Results of the regression model – $Y/Q \geq 0.3$

Prove Tests n.	Carichi Applicati Applied Loads			Variabile di risposta Response variable	Modello di regressione Regression Model	Errore Error
	Y/Q	S	R	$K_n = Y/\sum \varepsilon_i$	f (Y/Q; S)	e
	/	/	[MN/m]	[kN/ $\mu\epsilon$]	[kN/ $\mu\epsilon$]	%
1"	0.3	Nuovo New	50	0.210	0.210	0.0
2"	0.3	Nuovo New	150	0.210	0.210	0.0
3"	0.3	Usurato Worn	50	0.250	0.250	0.0
4"	0.3	Usurato Worn	150	0.250	0.250	0.0
5	1.2	Nuovo New	50	0.210	0.210	0.0
6	1.2	Nuovo New	150	0.210	0.210	0.0
7	1.2	Usurato Worn	50	0.215	0.215	0.0
8	1.2	Usurato Worn	150	0.215	0.215	0.0
9	0.55	Nuovo New	100	0.210	0.210	0.0
10	0.55	Usurato Worn	100	0.227	0.240	+ 5.4

zioni che non sarebbe stato possibile testare con prove sperimentali. Ad esempio, il polinomio approssimativo non include la rigidità degli attacchi e del ballast (R) perché la sua variazione non influenza la variabile di risposta. Pertanto, ciò dimostra, nelle condizioni e all'interno degli intervalli di parametri esaminati, che la rigidità non ha alcun effetto sui risultati del sistema di misura.

Analizzando il grafico, possiamo notare che il parametro K per il livello alto del fattore Y/Q assume lo stesso valore indipendentemente dallo stato di usura della rotaia (S) e quindi dai punti di contatto ruota-rotaia. Questa evidenza può essere spiegata considerando che la forza di contatto laterale ruota-rotaia (Y) ha più influenza di quella verticale (Q) sulle deformazioni della suola quando si ha il valore più alto del rapporto Y/Q. Quando invece questo rapporto diminuisce, il parametro K non è più costante ed aumenta il suo valore. Poiché i valori elevati di questo rapporto rappresentano le condizioni critiche per la sicurezza del veicolo contro il deragliamento ($Y/Q \leq 1.2$), possiamo considerare questa evidenza come un buon risultato. Infatti, lo scopo del sistema SMCT è quello di valutare la forza di contatto laterale e determinare le situazioni che superano il limite di sicurezza. Quando in-

proposed in our 2³ factorial design considering the wear status of the rail (S).

Thanks to the developed linear regression model (8), some important understanding of the SMCT measurement method [13] and its operating range could be obtained with some conditions that it is not possible to test with experimental tests. For example, the approximating polynomial does not include the stiffness of the fastenings and ballast (R) because its changes have no influence on the response variable. Therefore, this proves, under the conditions and within the parameter ranges investigated, that the stiffness has no consequence on the results of the measurement system.

Analysing the plot, we can notice that the variable K for the high level of the Y/Q factor assumes the same value regardless the wear status of the rail (S) and therefore from the wheel-rail contact points. This evidence can be explained considering that the wheel-rail lateral contact force (Y) has more influence than the vertical one (Q) on the rail foot strains for the higher value of the ratio Y/Q. On the other hand, when this ratio decreases, the variable K is no longer constant and increases its value. Since the high values of this ratio represent the critical conditions for the ve-

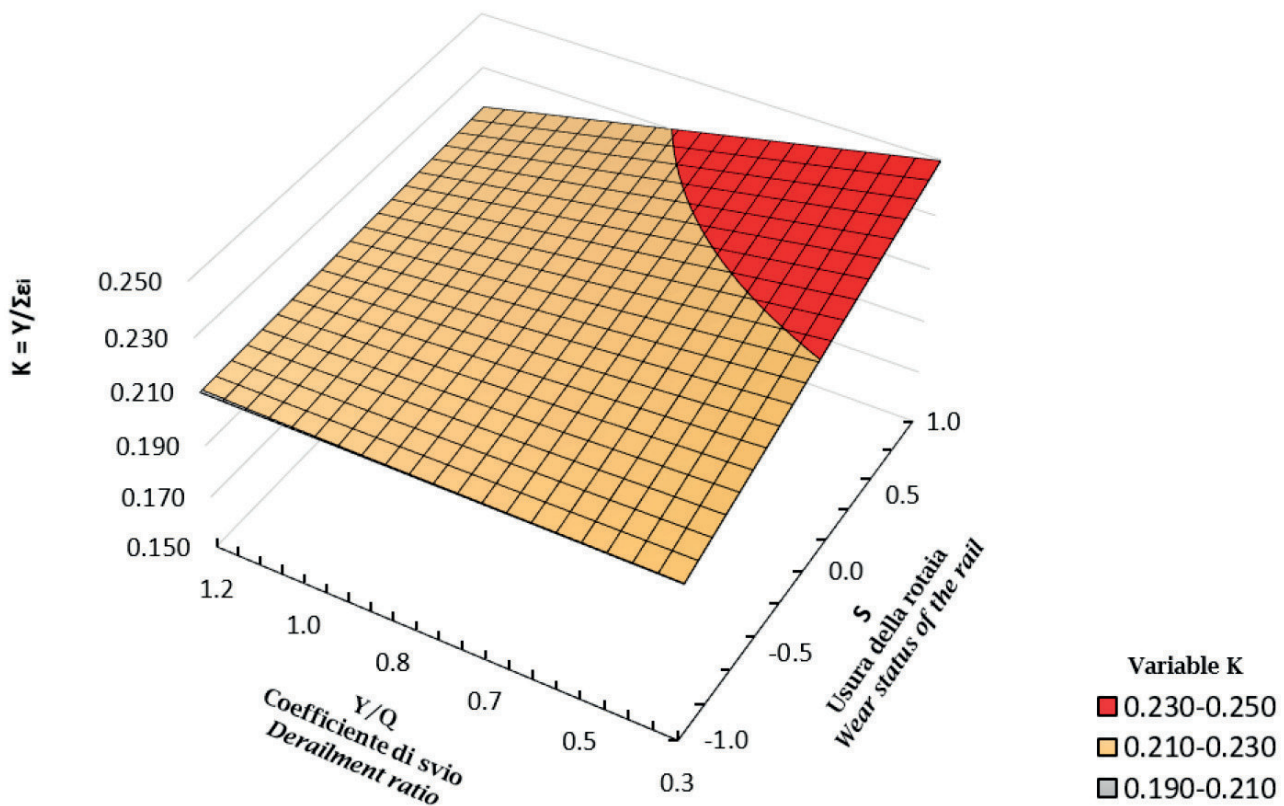


Figura 9 – Modello di regressione – Superficie di risposta.
Figure 9 – Regression model – Response surface.

vece c'è un valore basso del rapporto Y/Q , la situazione cambia: il parametro K non è influenzato dal rapporto Y/Q quando il profilo della rotaia è nuovo, mentre aumenta quando il profilo della rotaia è usurato, come mostrato in Tab. 4. La distribuzione dei punti di contatto ruota-rotaia per le due diverse condizioni di usura (Fig. 4 e Fig. 5), è probabilmente la ragione principale di questo effetto sul parametro K . Inoltre, cambiando i punti di contatto si modifica l'influenza delle forze verticali e laterali sulle deformazioni della suola: per un valore basso del coefficiente di svio questo effetto risulta più rilevante.

Questi risultati confermano l'intervallo operativo del sistema di misurazione SMCT [13]. Considerando le nostre assunzioni, si può infatti ipotizzare di ottenere risultati sperimentali con un errore inferiore al 3%, considerando un rapporto $Y/Q \geq 0.3$, indipendentemente dallo stato di usura della rotaia e dalla rigidità degli attacchi e del ballast.

5. Conclusioni

In questo articolo, utilizzando le tecniche di "Progettazione degli Esperimenti al Computer" applicate a simulazioni agli elementi finiti, è stato costruito un modello di regressione adattivo per la valutazione della robustezza

veicolo sicuro contro deragliamento ($Y/Q \leq 1.2$), we can assume this result as good achievement. In fact, the aim of the SMCT method is to evaluate the lateral contact force and determine the situations that exceed the safety limit. On the other hand, when there is a low value of the ratio Y/Q , the situation changes: the variable K is not influenced by the Y/Q ratio for a new rail profile, while it increases its magnitude for a worn rail profile, as shown in Tab. 4. The distribution of the wheel-rail contact points for the two different wear conditions (Fig. 4 and Fig. 5), is probably the main reason of this effect on the variable K . Furthermore, changing of the contact points modifies the influence of the vertical and lateral forces on the rail foot strains and for a low value of the derailment ratio this effect is more relevant.

These outcomes confirm the operating range of the SMCT measurement system [13]. In fact, considering our assumptions, we may suppose achieving of experimental results with an error of less than 3%, considering a ratio $Y/Q \geq 0.3$, regardless from the wear status of the rail and from the stiffness of fastening and ballast.

5. Conclusion

In this paper, using the "Design of Experiments" technique applied to finite element simulations, a regression

del sistema di misura ferroviario SMCT. Il sistema è stato valutato in alcune condizioni che è difficile verificare direttamente con prove sperimentali.

Nelle simulazioni, è stata focalizzata l'attenzione sui principali fattori che influenzano le deformazioni della suola della rotaia e confermato la dipendenza lineare tra questi fattori e il modello di regressione per il campo operativo del sistema SMCT. Il modello ha evidenziato che non vi è alcuna influenza sulle quantità valutate modificando la rigidità degli attacchi e del ballast (R), mentre lo stato di usura della rotaia (S) ha una sua rilevanza solo per valori bassi del coefficiente di svio (Y/Q).

model was designed for the evaluation of the robustness of the SMCT railway measurement system. The system was evaluated under some conditions, which are hard to apply in experimental investigations.

In the simulations, attention was focused on the main factors influencing rail foot strains and it was confirmed the linear dependence between these factors and the regression model for the SMCT operating range. The model showed that there is no influence on the evaluated quantities by changing the stiffness of the fastenings and ballast (R), while the wear status of the rail (S) has an important relevance but only for low levels of the derailment ratio (Y/Q).

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] RTR Special (2011), "Wayside Train Monitoring systems – An Actual Overview", Eurailpress.
- [2] F.M.D. ACCATTATIS, M. BRUNER, M. CATENA, G.R. CORAZZA, E. COSCIOTTI, G. MALAVASI, S. ROSSI, M. TESTA (2014), "Measurement of the vertical loads transferred to the rail", *Ingegneria Ferroviaria*, p. 1001-1041, December.
- [3] D. MILKOVIC, G. SIMIC, Z. JAKOVljeVIC, J. TANASKOVIC, V. LUCANIN (2013), "Wayside system for wheel-rail contact forces measurements, Measurement", *Journal of the International Measurement Confederation (Elsevier)*, Volume 46, 9 November, p. 3308-3318.
- [4] BRACCIALI, P. FOLGARAIT (2004), "New Sensor for Lateral and Vertical Wheel-Rail Forces Measurements", *Railway Engineering Conference*, 6-7 July, London, England.
- [5] C. DELPRETE, C. ROSSO (2009), "An easy instrument and a methodology for the monitoring and the diagnosis of a rail", *Mechanical System and Signal Processing*, vol. 23, p. 940-956.
- [6] D. CORTIS, M. BRUNER, G. MALAVASI, S. ROSSI, M. CATENA, M. TESTA (2017), "Estimation of the wheel-rail lateral contact force through the analysis of the rail web bending strains", *Measurement - Journal of the International Measurement Confederation (Elsevier)*, Volume 99, March, Pages 23-35.
- [7] F. YU, M.T. HENDRY (2019), "A new strain gauge configuration on the rail web to decouple the wheel-rail lateral contact force from wayside measurement", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 233, January, Pages 951-960.
- [8] W. ZHOU, S. ABDULHAKEEM, C. FANG, T. HAN, G. LI, Y. WU, Y. FAISAL (2020). "A new wayside method for measuring and evaluating wheel-rail contact forces and positions", *Measurement – Journal of the International Measurement Confederation (Elsevier)*, Volume 166, 15 December, 108244.
- [9] M. ANTIGNOLI, C. MARINACCI, S. RICCI, L. RIZZETTO (2020), "Requirement specifications for track measuring and monitoring systems", *Ingegneria Ferroviaria*, p. 841-864, November.
- [10] S. DACHUAN, E. ŠABANOVIĆ, L. RIZZETTO, V. SKRICKIJ, R. OLIVERIO, N. KAVIANI, Y. YUNGUANG, G. BUREIKA, S. RICCI, M. HECHT (2021), "Deep Learning based Virtual Point Tracking for Real-Time Target-less Dynamic Displacement Measurement in Railway Applications". *Sensors* (pre-print).
- [11] R. LICCIARDELLO, C. FUNFSCHILLING, G. MALAVASI (2017), "Accuracy of the experimental assessment of running dynamics characteristics quantified through an uncertainty framework". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231.8: 945-960.
- [12] EN 14363, (2012), "Railway applications – Testing and Simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles – Running Behaviour and stationary tests".
- [13] D. CORTIS, M. BRUNER, G. MALAVASI (2020), "Development of a wayside measurement system for the evaluation of wheel-rail lateral contact force", *Measurement - Journal of the International Measurement Confederation (Elsevier)*, Volume 159, 15 July, 107786.
- [14] M. BRUNER, D. CORTIS, G. MALAVASI (2016), "Rail Strain under Different Loads and Conditions as a Source of Information for Operation", in J. Pombo, (Editor), "Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance", Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, Paper 161.
- [15] D.C. MONTGOMERY (2001), "Design and Analysis of Experiments – 5Th Edition", John Wiley & Sons Inc.