

La misura delle forze di interazione ruota-rotaia nella diagnostica ferroviaria tra presente e futuro

MUSEO FERROVIARIO DI PIETRARSA - CONVEGNO CIFI
L'INTERAZIONE TRA MATERIALE ROTABILE E BINARIO



INDICE

1. Normativa
2. Come le forze influenzano il deterioramento dell'armamento
3. La misura delle forze di contatto ruota rotaia
4. La misura delle forze e Identificazione difetti
5. Big data e Diagnostica – Nuovi orizzonti
6. Conclusioni e sviluppi futuri



Normativa

Specifiche Tecniche di interoperabilità, Norme Europee e Norme UIC

- **REGOLAMENTO (UE) N. 1302/2014 DELLA COMMISSIONE**

- 4.2.3. *Interazione ruota-rotaia e sagoma*

Norme EN

- EN 15654-2:2019 – Misura delle forze verticali su ruota e sale montate
- CEI EN 50215:2011 - 8.5.3 Prove di tipo di Pesatura
- EN 14363:2016+A2:2022

Norme UIC:

- ORE B55 RP8
- UIC 518 : 4ED 2009

ITC CERTIFER SPA
 UNiStore - Download prepagato - download del 29/03/2023

EUROPEAN STANDARD

EN 14363:2016+A2

NORME EUROPÉENNE

EUROPÄISCHE NORM

August 2022

ICS 45.060.01

Supersedes EN 14363:2016+A1:2018

English Version

Railway applications - Testing and Simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles - Running Behaviour and stationary tests

UIC CODE

518

Bahnanwendungen - Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen - Fahrverhalten und stationäre Versuche

4th edition, September 2009

Original

OR

Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour - Safety - Track fatigue - Running behaviour

*Essais et homologation de véhicules ferroviaires du point de vue du comportement dynamique - Sécurité - Fatigue de la voie - Qualité de marche
 Fahrtechnische Prüfung und Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen - Fahrsicherheit, Fahrwegbeanspruchung und Fahrverhalten*

Normativa

Specifiche Tecniche di interoperabilità, Norme Europee e Norme UIC

MISURA DELLE FORZE E' INCENTRATA SULLA PIENA CARATTERIZZAZIONI DI UN VEICOLO

- **Staticamente:**
 - Prova di pesatura
 - prova al banco sghembi
- **Quasi staticamente:**
 - Prova per la verifica alla sicurezza svio con percorrenza di curva di raggio 150 m
- **Dinamicamente:**
 - Prova di dinamica di marcia per valutare:

SICUREZZA

Influenzata dal binario

FATICA DEL BINARIO

Per quantificare l'impatto del veicolo sul binario.



Normativa

Norma EN14363

- SICUREZZA DI MARCIA VALUTABILE ATTRAVERSO LE FORZE (SOLO SOTTO CONDIZIONI PARTICOLARI ANCHE ACCELERAZIONI)
- **FATICA DEL BINARIO VALUTABILE SOLO ATTRAVERSO LE FORZE COME VALORI MASSIMI E QUASI STATICI**

- Normativa europea EN 14363 nella sua ultima revisione:

- Aggiunto parametro B, presente nella UIC518
- Accolte le modifiche proposte in seguito alla campagna Dynotrain fra cui T_{qst}

- Carichi su binario

- In alcuni casi assenti i limiti
- Dati utili per la valutazione dell'usura della rotaia ed il deterioramento dell'armamento.

Necessaria raccolta dati

Assessment quantity L = to be compared with limit value; D = to be documented, but not to be compared with the limit value		Test method			Limit values		
		Normal	Simplified H-Force	Simplified acceleration	Locomotives, Traction units, passenger vehicles	Freight wagons with bogies	Freight wagons with single axles
Track loading							
Quasi-static guiding force	$Y_{j,qst}$	[L] e	—	—	60 kN		
Quasi-static vertical wheel force	$Q_{j,qst}$	L	—	—	$P_{r0} \leq 225$ kN:	145 kN	
					225 kN < $P_{r0} \leq 250$ kN:	155 kN	
Max. vertical wheel force	$Q_{j,max}$	L	—	—	Test zones 1 and 2: $V_{adm} \leq 160$ km/h: MIN(90 kN + $\frac{P_{r0}}{100}$ Q_{r0} $\frac{V_{adm}}{160}$; 200 kN) 160 km/h < $V_{adm} \leq 200$ km/h: MIN(90 kN + $\frac{P_{r0}}{100}$ Q_{r0} $\frac{V_{adm}}{200}$; 190 kN) 200 km/h < $V_{adm} \leq 250$ km/h: MIN(90 kN + $\frac{P_{r0}}{100}$ Q_{r0} $\frac{V_{adm}}{250}$; 180 kN) 250 km/h < $V_{adm} \leq 300$ km/h: MIN(90 kN + $\frac{P_{r0}}{100}$ Q_{r0} $\frac{V_{adm}}{300}$; 170 kN) $V_{adm} > 300$ km/h: MIN(90 kN + $\frac{P_{r0}}{100}$ Q_{r0} $\frac{V_{adm}}{300}$; 160 kN) Test zones 3 and 4: MIN(90 kN + $\frac{P_{r0}}{100}$ Q_{r0} $\frac{V_{adm}}{300}$; 200 kN) For all test zones with $V_{adm} \leq 100$ km/h and 225 kN < $P_{r0} \leq 250$ kN: MIN(90 kN + $\frac{P_{r0}}{100}$ Q_{r0} $\frac{V_{adm}}{300}$; 210 kN)		
Quasi-static rail load parameter f $ Y_{j,qst} + 0,83 Q_{j,qst}$	$B_{j,qst}$	D	—	—	—		
Max guiding force f	$Y_{j,max}$	D	—	—	—		
Max rail load parameter f $(Y +0,91 \cdot Q)_{max}$	$B_{j,max}$	D	—	—	—		
Rail surface damage quantity (see [3])	T_{qst}	$\frac{P_{r0}}{100}$ D $\frac{V_{adm}}{300}$ R	—	—	—		

1. EN 14363. Railway applications—Testing and simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles—Running Behaviour and stationary tests. 2019
2. UIC CODE 518. Testing and Approval of Railway Vehicles From the Point of View of their Dynamic Behaviour—Safety—Track Fatigue—Running Behaviour. 2009.

Parametri che influenzano il deterioramento dell'armamento

I risultati della campagna Dynotrain

- **Q_{qst} : forza verticale quasi statica su rotaia esterno curva**
 - Associata al deterioramento di rotaia, massicciata, sottofondo, difetti di livello
- **Q o Q_{max} : forza verticale dinamica**
 - associata con deterioramento di rotaia, sistemi di fissaggio, traversine, massicciata, sottofondo, difetti di livello
- **Y_{qst} : forza laterale quasi statica su rotaia esterno curva:**
 - Usura della rotaia esterna
 - Resistenza laterale del binario
 - Saldature
 - Giunti e sistemi di fissaggio
 - Resistenza a stress laterali
 - Difetti di allineamento
- **ΣY_{max} : somma delle forze laterali**
 - Massicciata - spostamento laterale del binario
- **Y_{max} : forza laterale massima su rotaia esterno curva:**
 - Usura della rotaia esterna
 - sistemi di fissaggio
 - Difetti di allineamento
- **$B_{qst, max}$: forza risultante su rotaia esterno curva:**
 - Fatica della rotaia e sui sistemi di fissaggio
- **T_{qst}**
 - Danneggiamenti superficiali delle rotaie

Table 2. Relationships between track deterioration effects and vehicle assessment parameters.

	Track deterioration effect						
	Fatigue / wear of rails	Fastenings	Sleepers	Ballast	Track bed	Track geometry Vertical / cross-level	Track geometry lateral
Q_{qst}	✓			✓	✓	✓	
Q or Q_{max}	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Y_{qst}	✓	✓					✓
ΣY_{max}				✓			✓
Y_{max}	✓	✓					✓
T_{qst}	✓						
B_{qst}	✓	✓					
B_{max}	✓	✓					

1. EICKHOFF, Bridget, et al. Track loading limits and cross-acceptance of vehicle approvals. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2015, 229.6: 710-728.

Parametri che influenzano il deterioramento dell'armamento

Deterioramento dell'armamento

- Difetti della rotaia
 - Sulla superficie quali:
 - Usura 45°
 - Fatica da contatto di rotolamento
 - Usura ondulatoria
 - Fenditure sul gambo e nei fori di giunzione

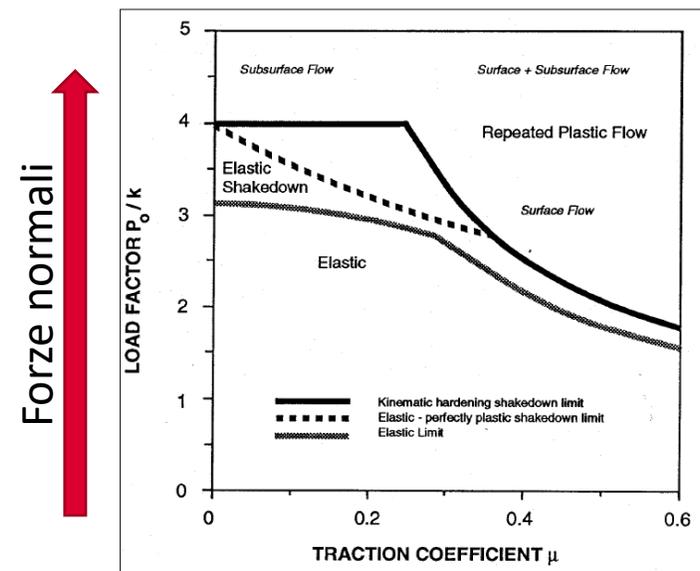
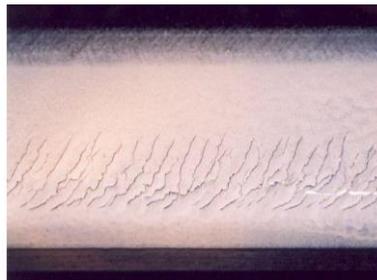
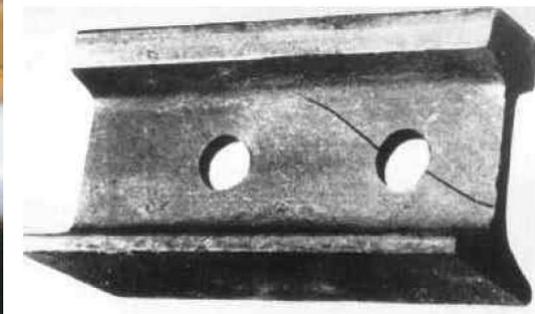


Table 2. Relationships between track deterioration effects and vehicle assessment parameters.

	Track deterioration effect						
	Fatigue / wear of rails	Fastenings	Sleepers	Ballast	Track bed	Track geometry Vertical / cross-level	Track geometry lateral
Q_{qst}	✓			✓	✓	✓	
Q or Q_{max}	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Y_{qst}	✓	✓					✓
ΣY_{max}				✓			✓
Y_{max}	✓	✓					✓
T_{qst}	✓						
B_{qst}	✓	✓					
B_{max}	✓	✓					



1. MAGEL, Eric E., et al. Rolling contact fatigue: a comprehensive review. 2011
2. Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: wheel and rail interface issues

Parametri che influenzano il deterioramento dell'armamento

Deterioramento dell'armamento

- Deterioramento componenti dell'armamento

- Attacchi
- Traverse
- Ballast

- Deterioramento della geometria

- Allineamento
- Livello longitudinale
- Sghembo
- Sopraelevazione

Table 2. Relationships between track deterioration effects and vehicle assessment parameters.

	Track deterioration effect						
	Fatigue / wear of rails	Fastenings	Sleepers	Ballast	Track bed	Track geometry Vertical / cross-level	Track geometry lateral
Q_{qst}	✓				✓	✓	
Q or Q_{max}	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Y_{qst}	✓	✓					✓
ΣY_{max}				✓			✓
Y_{max}	✓	✓					✓
T_{qst}	✓						
B_{qst}	✓	✓					
B_{max}	✓	✓					



Parametri che influenzano il deterioramento dell'armamento

I risultati della campagna Dynotrain

- Le forze di interazione sono a loro volta influenzate da:
 - Condizioni operative
 - Caratteristiche dell'armamento
 - Difetti dell'armamento
 - Geometria del binario

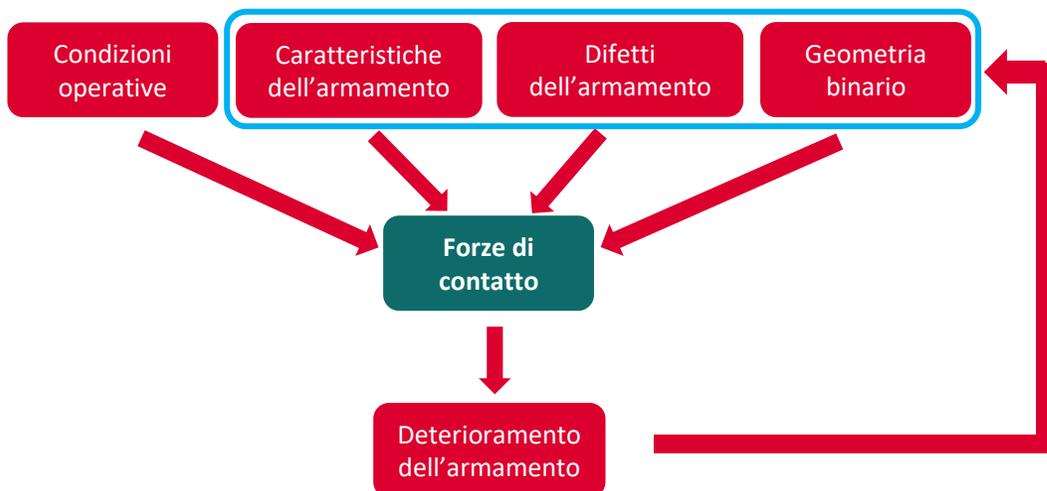


Table 4. Relationships between vehicle assessment parameters and track / operating conditions.

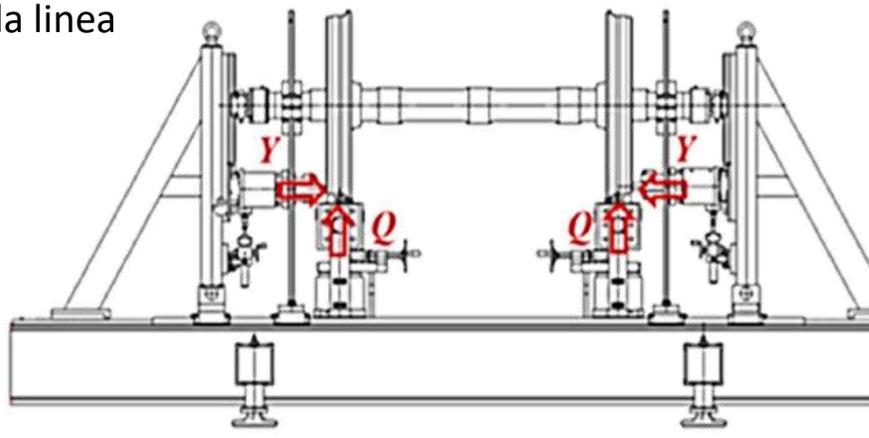
	Operating conditions		Track installation					Track geometry	
	Speed	Cant deficiency	Curve radius	Sleeper type and spacing	Rail type	Ballast	Track support stiffness	Track quality – vertical / cross-level	Track quality – lateral
Q_{qst} – quasi-static vertical wheel load		✓							
Q or Q_{max} – maximum vertical wheel force	(✓)	✓		✓			✓	✓	
Y_{qst} – quasi-static lateral guiding force		(✓)	✓						
ΣY_{max} – lateral track-shifting force	(✓)	✓	✓	✓		✓	✓		✓
Y_{max} – maximum guiding force		(✓)	✓	(✓)					✓
T_{qst} – rail surface damage assessment		✓	✓					(✓)	✓
B_{qst} – quasi-static loading forces		✓	✓		✓				
B_{max} – maximum loading forces		✓	✓		✓				

1. EICKHOFF, Bridget, et al. Track loading limits and cross-acceptance of vehicle approvals. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2015, 229.6: 710-728.

Misura delle forze di contatto ruota rotaia

Metodi di misura

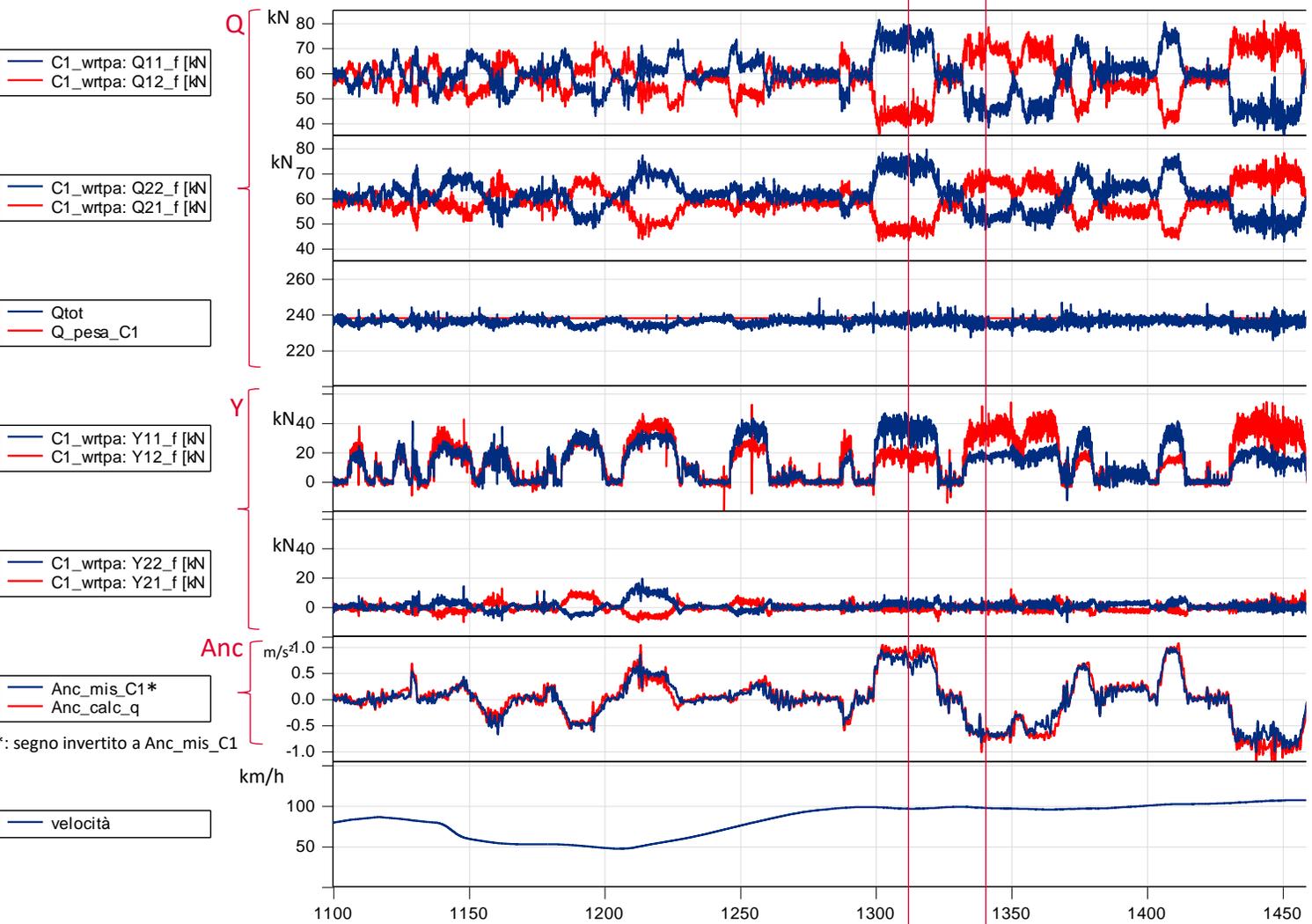
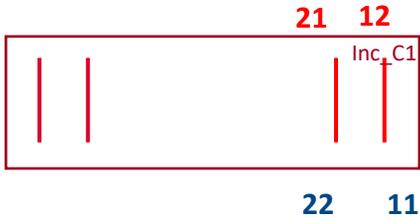
- Sistemi installati a terra
 - Metodi basati su deformazione della rotaia
 - Dispositivi installati sul binario o rotaie strumentate
 - Utilizzati per diagnostica di medio-lungo termine
 - Utili per valutare massivamente i treni
- Sistemi installati a bordo
 - Metodi basati su deformazioni della sala o delle sospensioni
 - Utilizzo di estensimetri o sensori di spostamento
 - Utili per valutare massivamente la linea
- Grandezze di studio
 - Forze verticali Q
 - Forze laterali Y
 - Forze longitudinali X



1. ZAPPACOSTA, Carmine, et al. Overview of measurement chain and instrumentation setup for running dynamics on-track tests-normal method-according to EN-14363 standard. In: 2019 AEIT International Annual Conference (AEIT). IEEE, 2019. p. 1-6.

Misura delle forze di contatto ruota rotaia

Andamento dei segnali nel tempo



- Q aumenta sulla ruota esterna, diminuisce su quella interna
 - Curva a dx (es. t=1340s): Q_{12} e Q_{21} ↑ Q_{11} e Q_{22} ↓
 - Curva a sx (es. t=1310s): Q_{11} e Q_{22} ↑ Q_{12} e Q_{21} ↓

2) In rettilineo e con velocità maggiore di 30 km/h:
 $Q_{tot} = \sum Q_{ij}$ pari al valore statico misurato al banco di pesatura
 $Q_{tot} = 236.7$ kN

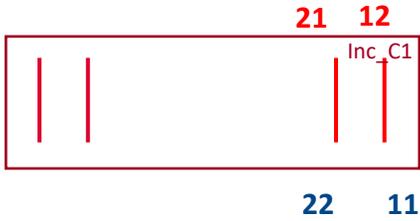
- Sull'asse anteriore, in curva Y aumenta in modo maggiore o uguale sul lato esterno
 - Curva a dx (es. t=1340s): Y_{12} ↑ $Y_{12} \geq Y_{11}$
 - Curva a sx (es. t=1310s): Y_{11} ↑ $Y_{11} \geq Y_{12}$

4) Le variazioni di Y sono tendenzialmente inferiori sull'asse posteriore (minori al diminuire al raggio di curvatura)

5) In piena curva e con velocità >70km/h:
 $Anc_calcolata$ (sale) ~ $Anc_misurata$ (inclinometro)

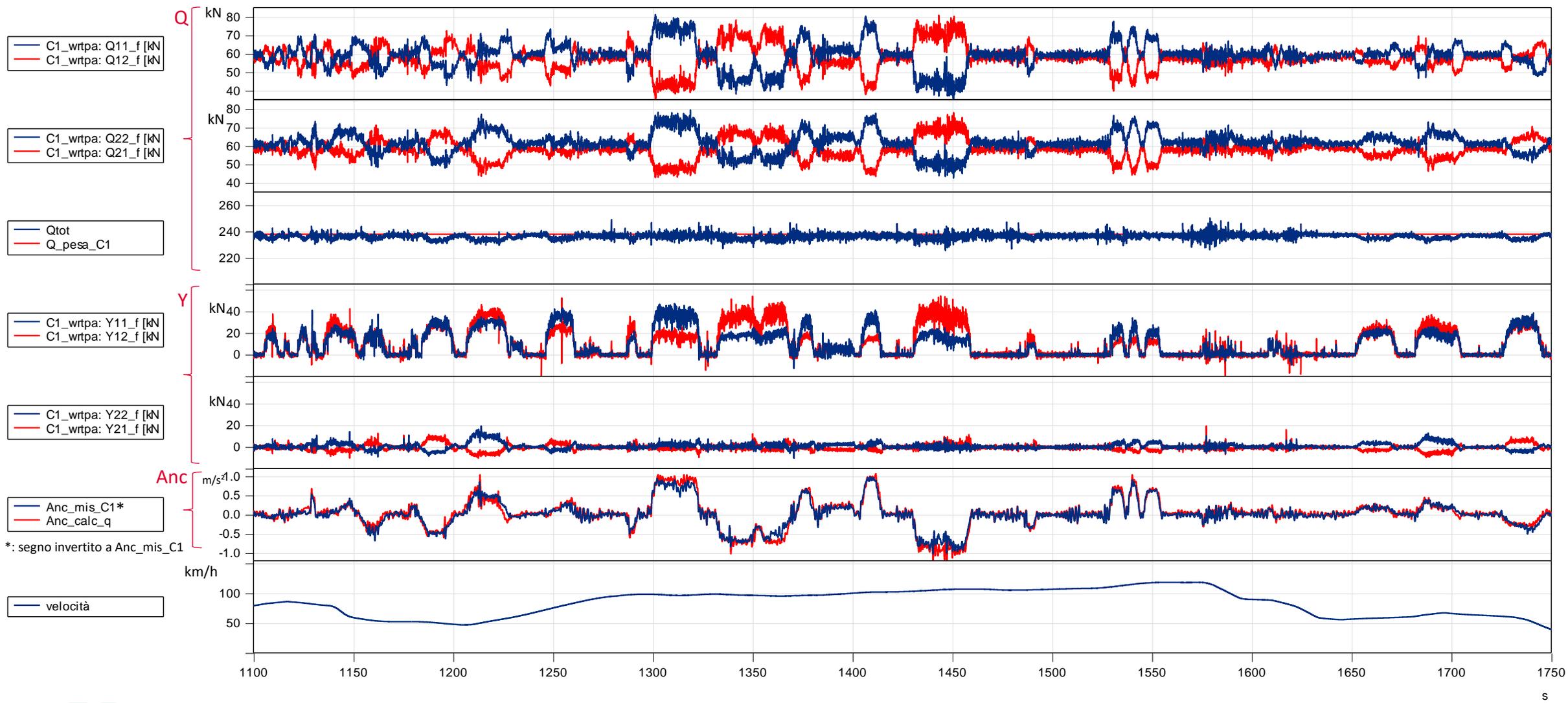
- Inclinazione verso l'esterno della curva (non a bassa velocità)
 - Curva a dx → $Anc_C1 < 0$ (es. t=1340s)
 - Curva a sx → $Anc_C1 > 0$ (es. t=1310s)

Misura delle forze di contatto ruota rotaia



Direzione di marcia

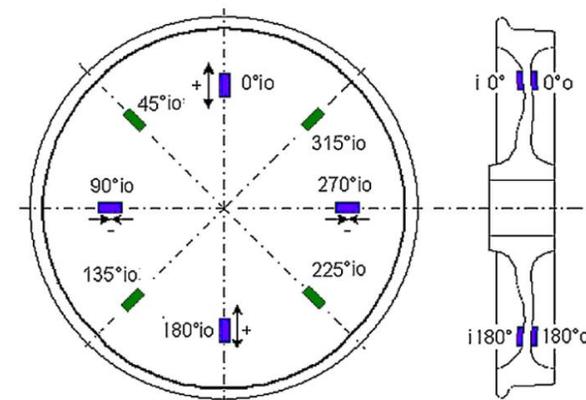
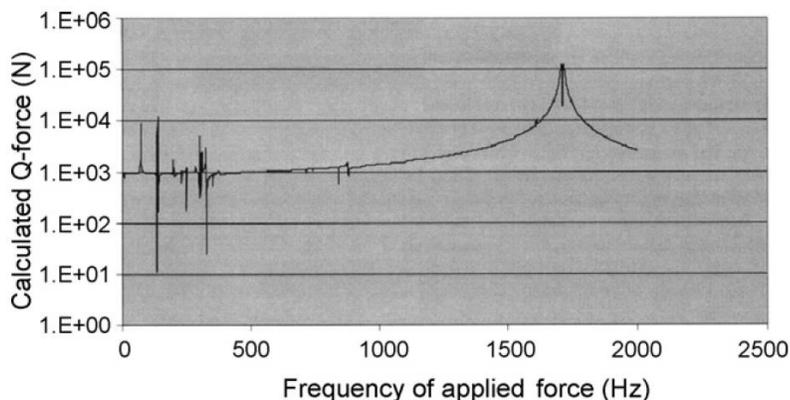
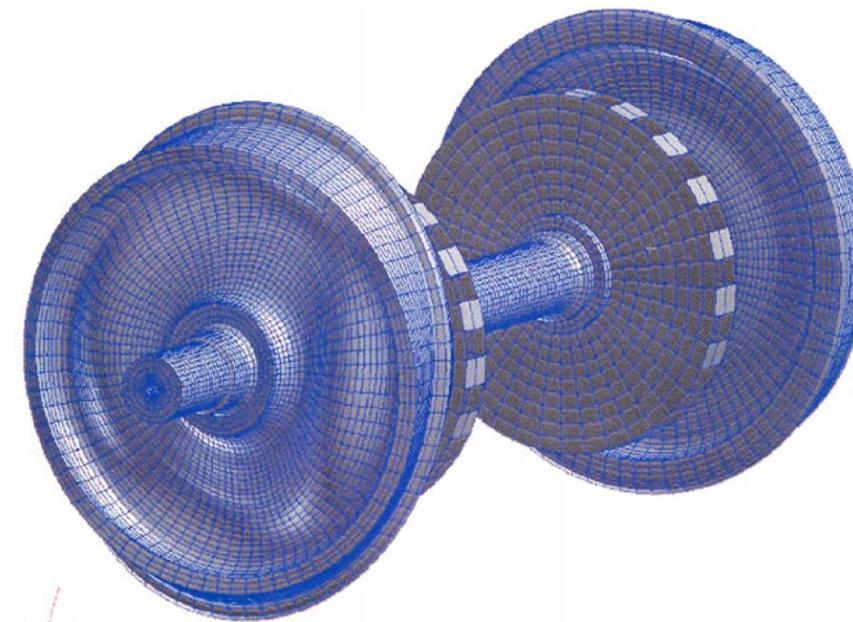
Andamento dei segnali nel tempo



Misura delle forze di contatto ruota rotaia

Correlazione forze - difetti

- Necessario avere un'elevata frequenza di acquisizione
- Studi mostrano la possibilità di valutare le forze di interazione ruota-rotaia fino a un massimo di 2 kHz
 - Necessario conoscere modi propri della sala
 - Valutare eventuali correzioni con funzioni di trasferimento nel dominio delle frequenze

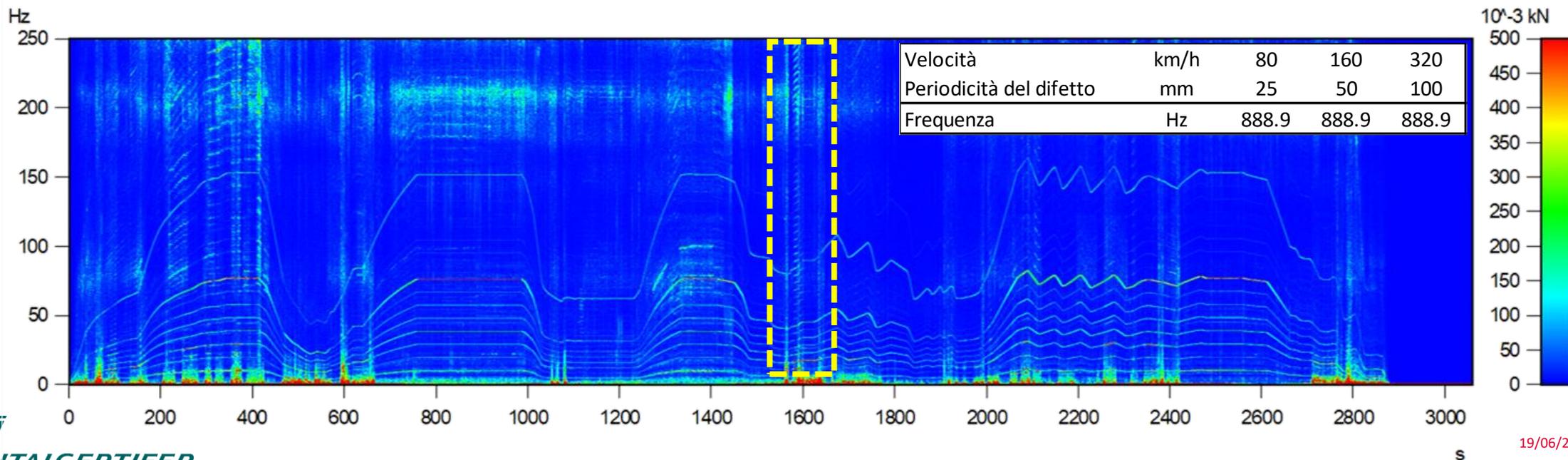
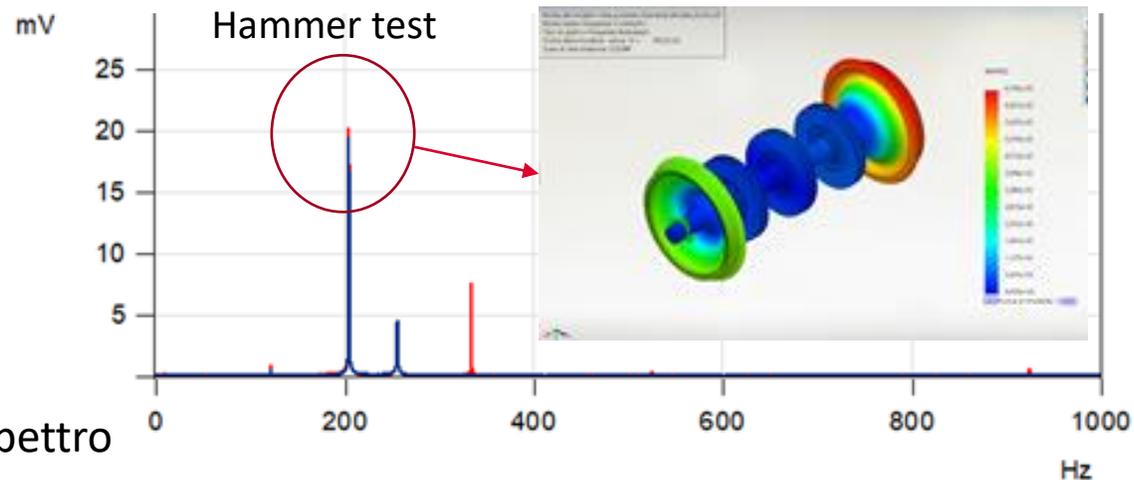


1. Gullers, Per, Lars Andersson, and Roger Lundén. "High-frequency vertical wheel–rail contact forces—Field measurements and influence of track irregularities." *Wear* 265.9-10 (2008): 1472-1478.
2. Nielsen, Jens CO. "High-frequency vertical wheel–rail contact forces—validation of a prediction model by field testing." *Wear* 265.9-10 (2008): 1465-1471.

Misura delle forze di contatto ruota rotaia

Attuali possibilità

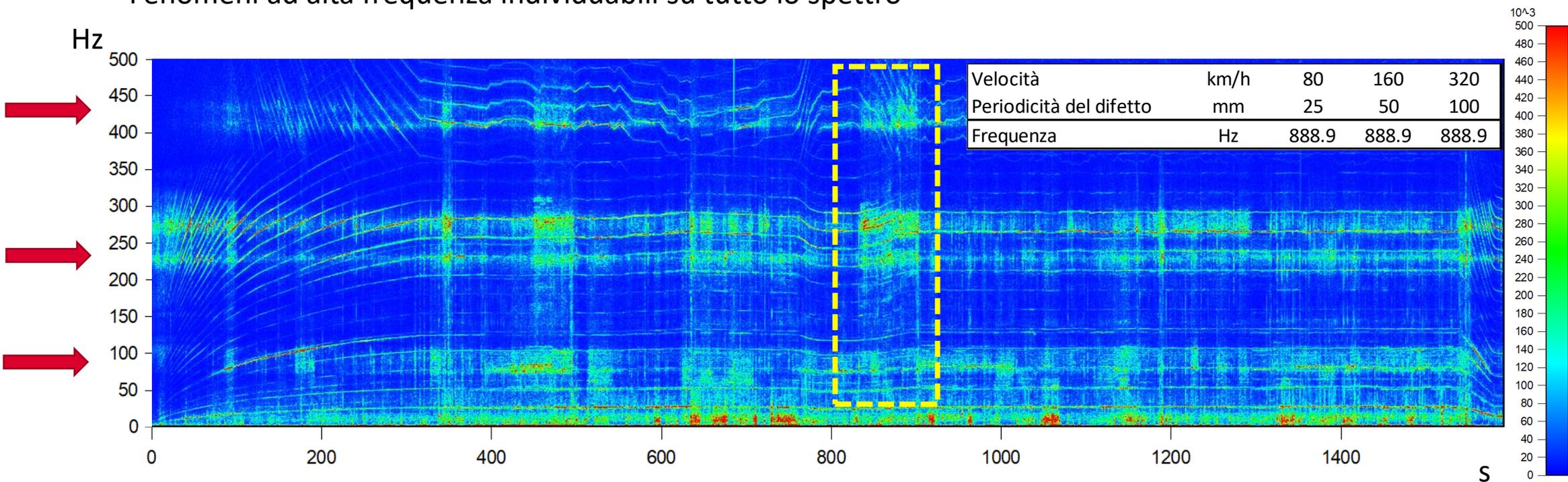
- Treno Alta Velocità - Misura forza Y
 - Acquisito a 500 Hz
 - Forze Y sensibili per tutto il range di frequenza
 - Estendibile fino a 1kHz
 - Presenza di alcune frequenze di risonanza
 - Fenomeni ad alta frequenza individuabili su tutto lo spettro



Misura delle forze di contatto ruota rotaia

Attuali possibilità

- Veicolo alta velocità – Misura forza Y
 - Acquisito a 2000 Hz
 - Forze Y sensibili per tutto il range di frequenza
 - Presenza di alcune frequenze di risonanza
 - Fenomeni ad alta frequenza individuabili su tutto lo spettro



Misura delle forze e Identificazione difetti

Correlazione note forze - difetti

- Misure di forza per riconoscere un difetto
 - Modelli predittivi per fenomeni semplici
 - Machine learning per fenomeni complessi
 - Preparazione dati → “features”
 - Parametri di natura statistica
 - Ordinati per sezione e condizioni operative
 - Analisi dei dati
 - Input → vettore di features
 - Output → probabilità di difetto presente
 - Training
 - Ispezione manuale da parte di operatori
 - Dati di misura significativi e rappresentativi del difetto
 - Eventuali aggiornamenti durante ulteriori acquisizioni di dati

1. YANG, Fei, et al. Wheel-rail rolling contact behavior induced by both rail surface irregularity and sleeper hanging defects on a high-speed railway line. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 128: 105604.

Misura delle forze e Identificazione difetti

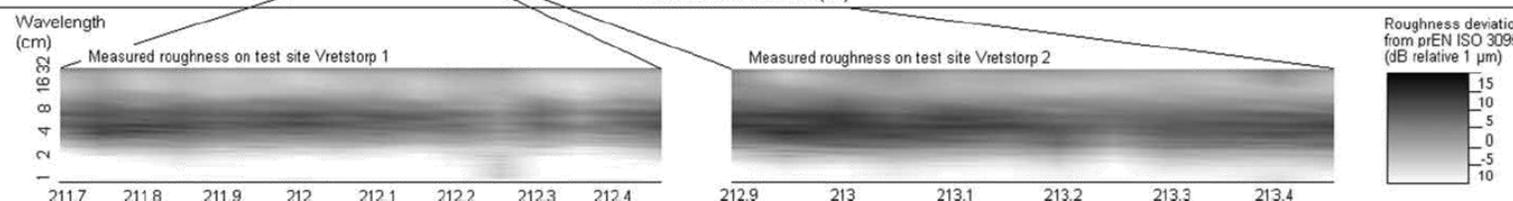
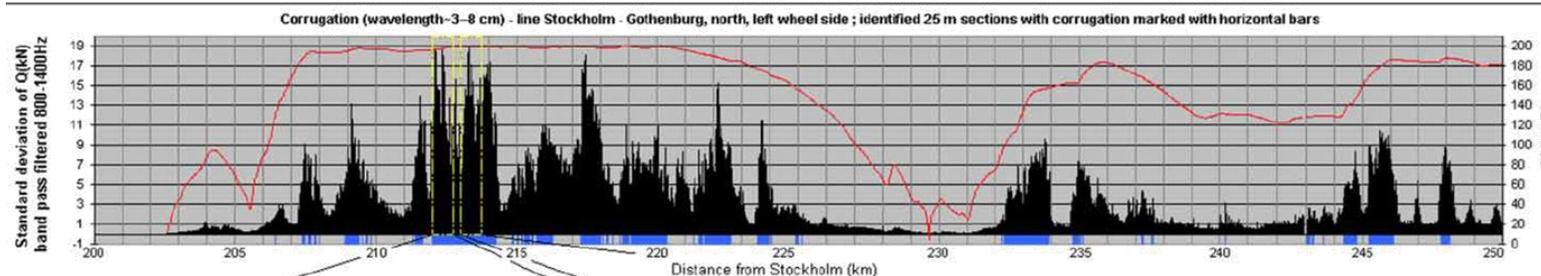
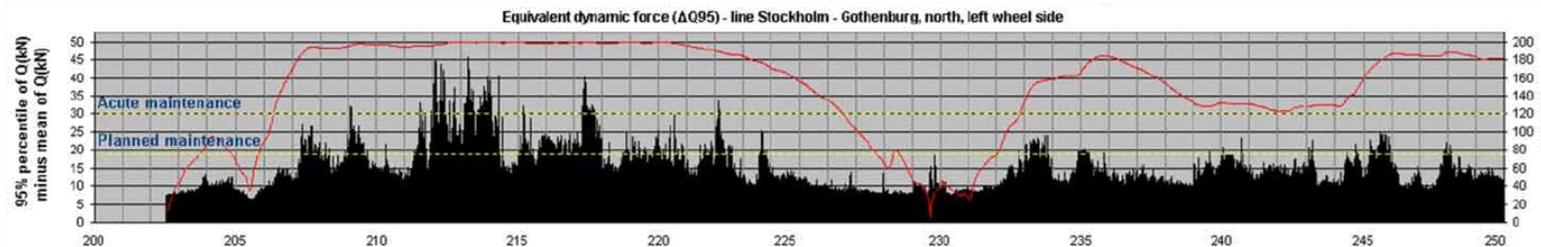
Esempio utilizzo di intelligenza artificiale nell'identificazione di correlazioni note

- Valutazione manutenzione linea

- Urgente: $\Delta Q_{95} \geq 30 \text{ kN}$
- Da pianificare: $19 \text{ kN} \leq \Delta Q_{95} < 30 \text{ kN}$

- Identificazione di 3 tipologie di difetto:

- Difetti periodici a bassa lunghezza d'onda (es. corrugazione rotaia di lunghezza d'onda 3-8cm)
- Difetti che causano transitori di forza periodici
- Difetti che causano transitori di forza isolati

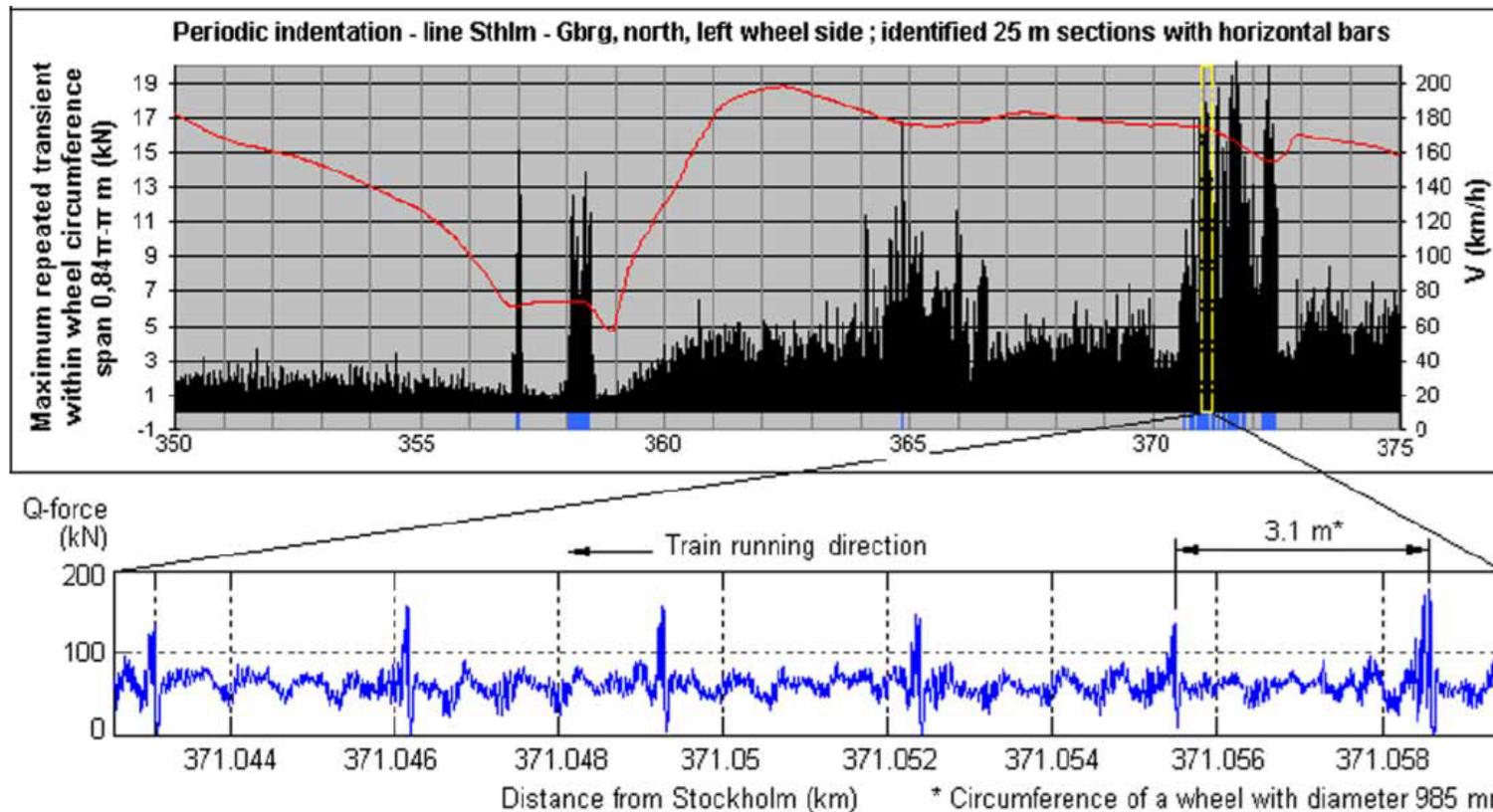


1. GULLERS, Per; ANDERSSON, Lars; LUNDÉN, Roger. High-frequency vertical wheel-rail contact forces—Field measurements and influence of track irregularities. *Wear*, 2008, 265.9-10: 1472-1478.
2. GULLERS, Per, et al. Track condition analyser: identification of rail rolling surface defects, likely to generate fatigue damage in wheels, using instrumented wheelset measurements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2011, 225.1: 1-13.

Misura delle forze e Identificazione difetti

Esempio utilizzo di intelligenza artificiale nell'identificazione di correlazioni note

- Identificazione di 3 tipologie di difetto:
 - Difetti periodici a bassa lunghezza d'onda (es. corrugazione rotaia di lunghezza d'onda 3-8cm)
 - Difetti che causano transitori di forza periodici
 - Difetti che causano transitori di forza isolati



1. GULLERS, Per; ANDERSSON, Lars; LUNDÉN, Roger. High-frequency vertical wheel–rail contact forces—Field measurements and influence of track irregularities. *Wear*, 2008, 265.9-10: 1472-1478.
2. GULLERS, Per, et al. Track condition analyser: identification of rail rolling surface defects, likely to generate fatigue damage in wheels, using instrumented wheelset measurements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2011, 225 1: 1-13.

Misura delle forze e Identificazione difetti

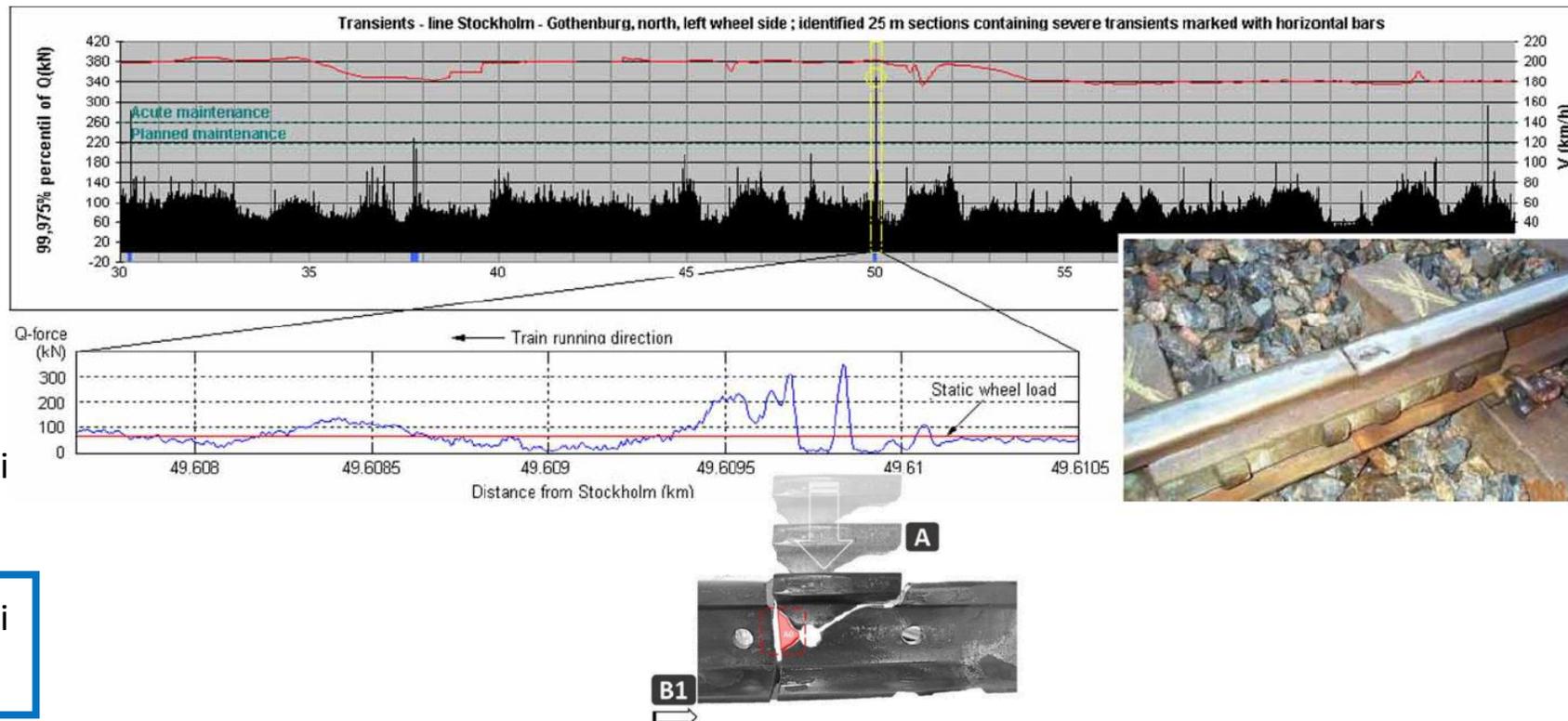
Esempio utilizzo di intelligenza artificiale nell'identificazione di correlazioni note

- Identificazione di 3 tipologie di difetto:

- Difetti periodici a bassa lunghezza d'onda (es. corrugazione rotaia di lunghezza d'onda 3-8cm)

- Difetti che causano transitori di forza periodici

- Difetti che causano transitori di forza isolati

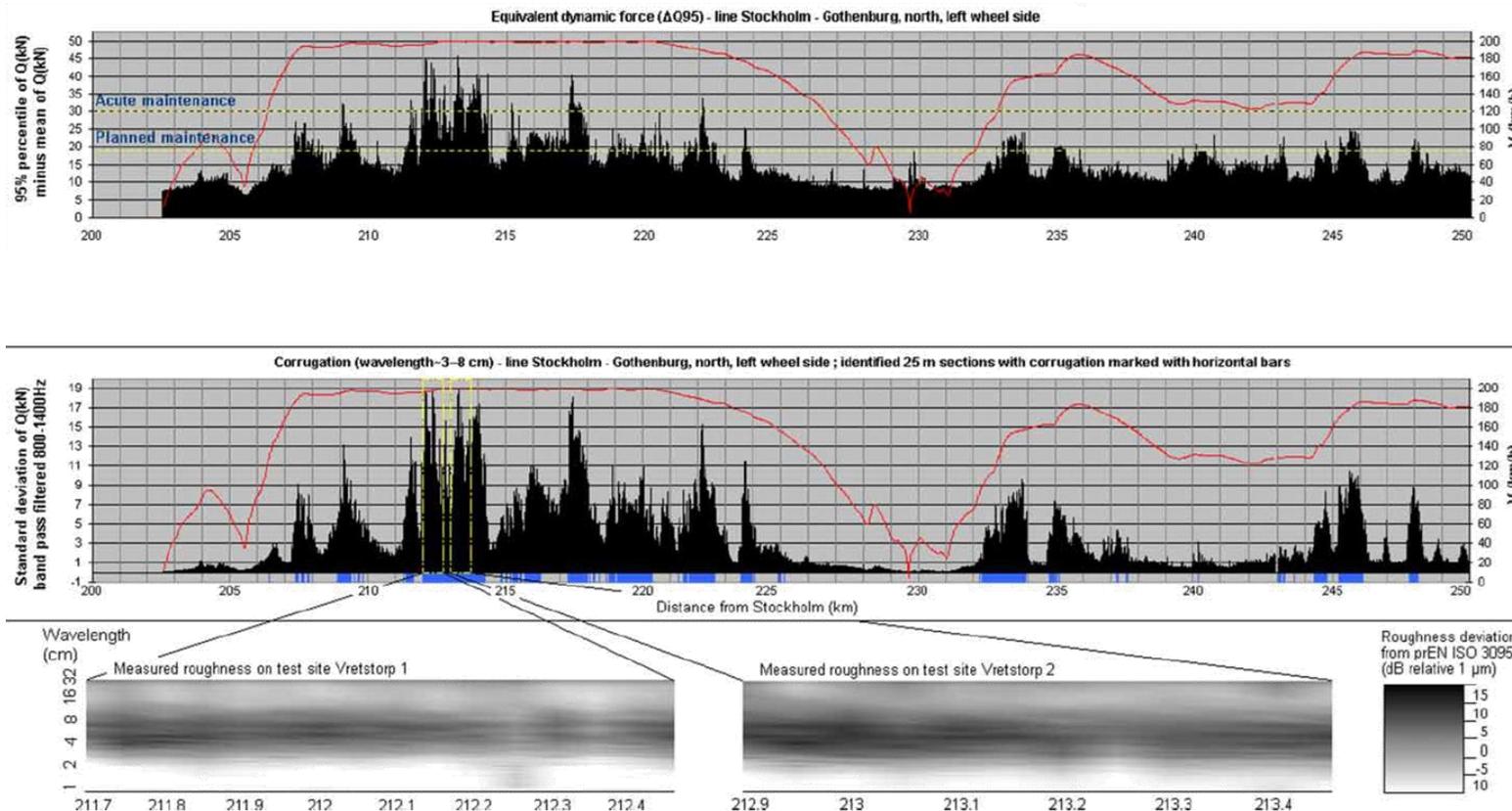


1. GULLERS, Per; ANDERSSON, Lars; LUNDÉN, Roger. High-frequency vertical wheel–rail contact forces—Field measurements and influence of track irregularities. *Wear*, 2008, 265.9-10: 1472-1478.
2. GULLERS, Per, et al. Track condition analyser: identification of rail rolling surface defects, likely to generate fatigue damage in wheels, using instrumented wheelset measurements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2011, 225.1: 1-13.

Misura delle forze e Identificazione difetti

Esempio utilizzo di intelligenza artificiale nell'identificazione di correlazioni note

- Valutazione manutenzione linea
 - Urgente: $\Delta Q_{95} \geq 30 \text{ kN}$
 - Da pianificare: $19 \text{ kN} \leq \Delta Q_{95} < 30 \text{ kN}$
- Identificazione di 3 tipologie di difetto:
 - Difetti periodici a bassa lunghezza d'onda (es. corrugazione rotaia di lunghezza d'onda 3-8cm)
 - Difetti che causano transitori di forza periodici
 - Difetti che causano transitori di forza isolati

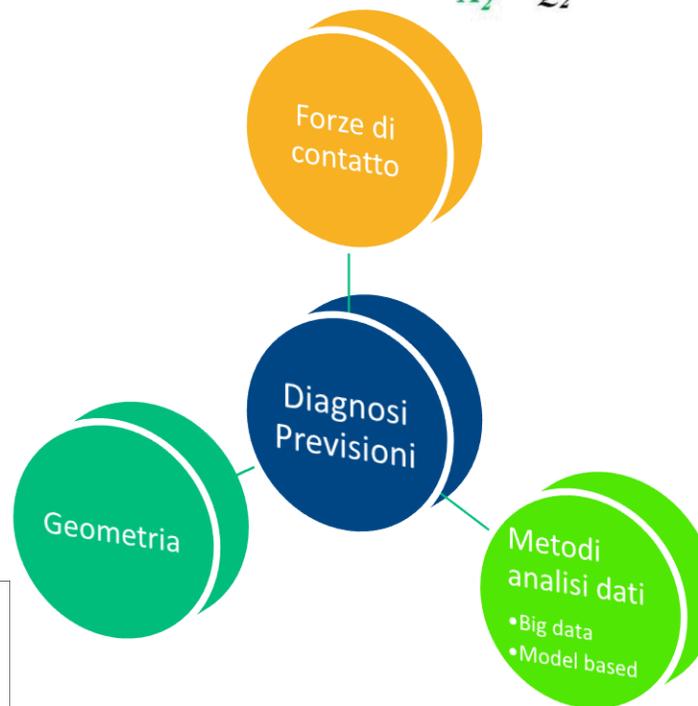
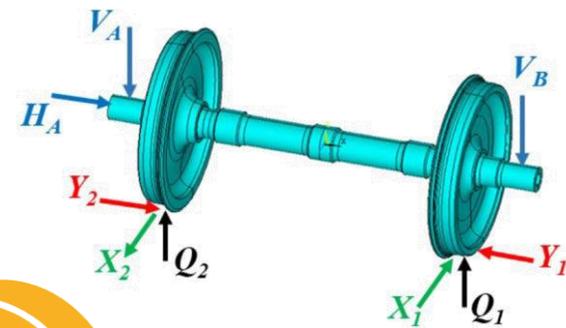
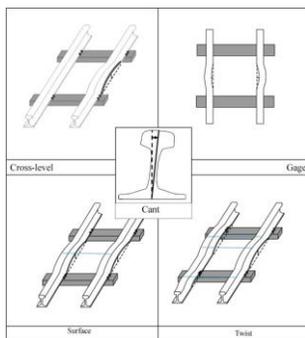


1. GULLERS, Per; ANDERSSON, Lars; LUNDÉN, Roger. High-frequency vertical wheel-rail contact forces—Field measurements and influence of track irregularities. *Wear*, 2008, 265.9-10: 1472-1478.
2. GULLERS, Per, et al. Track condition analyser: identification of rail rolling surface defects, likely to generate fatigue damage in wheels, using instrumented wheelset measurements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2011, 225.1: 1-13.

Big data e Diagnostica – Nuovi orizzonti

La nuova flotta dei veicoli diagnostici RFI

- Campagna di misura estesa
 - Linee percorse
 - Condizioni operative
 - Elevata frequenza di acquisizione
 - Parametri acquisiti
 - Geometria
 - Accelerazioni
 - Forze
 - Immagini



Big data e Diagnostica – Nuovi orizzonti

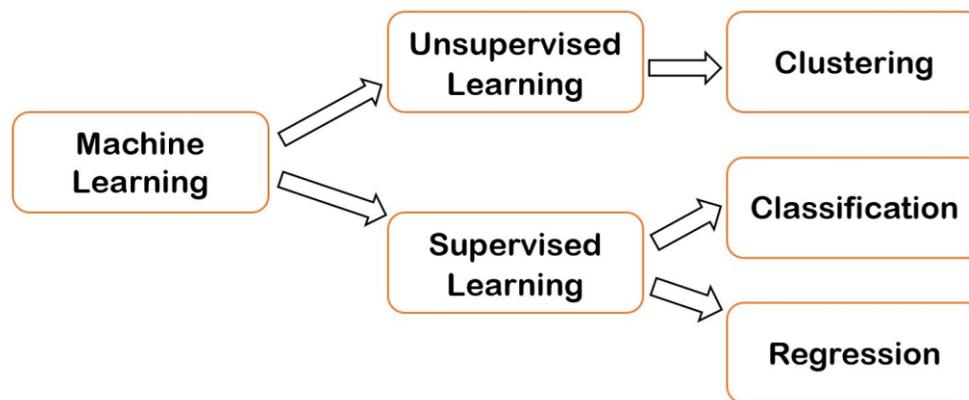
Approcci possibile per lo sviluppo

Come utilizzare i dati per la diagnostica dell'infrastruttura:

- Modelli predittivi per fenomeni semplici e relazioni note
- Machine learning per fenomeni complessi
 - Output ignoti → Unsupervised learning
 - Output noti → Supervised learning



- Prevedere analiticamente il degrado dell'armamento
- Definire le priorità nella manutenzione in base all'impatto effettivo sulla sicurezza
- Diagnosticare precocemente difetti attualmente più difficili da misurare
- Portare a un aggiornamento normativo
- ?



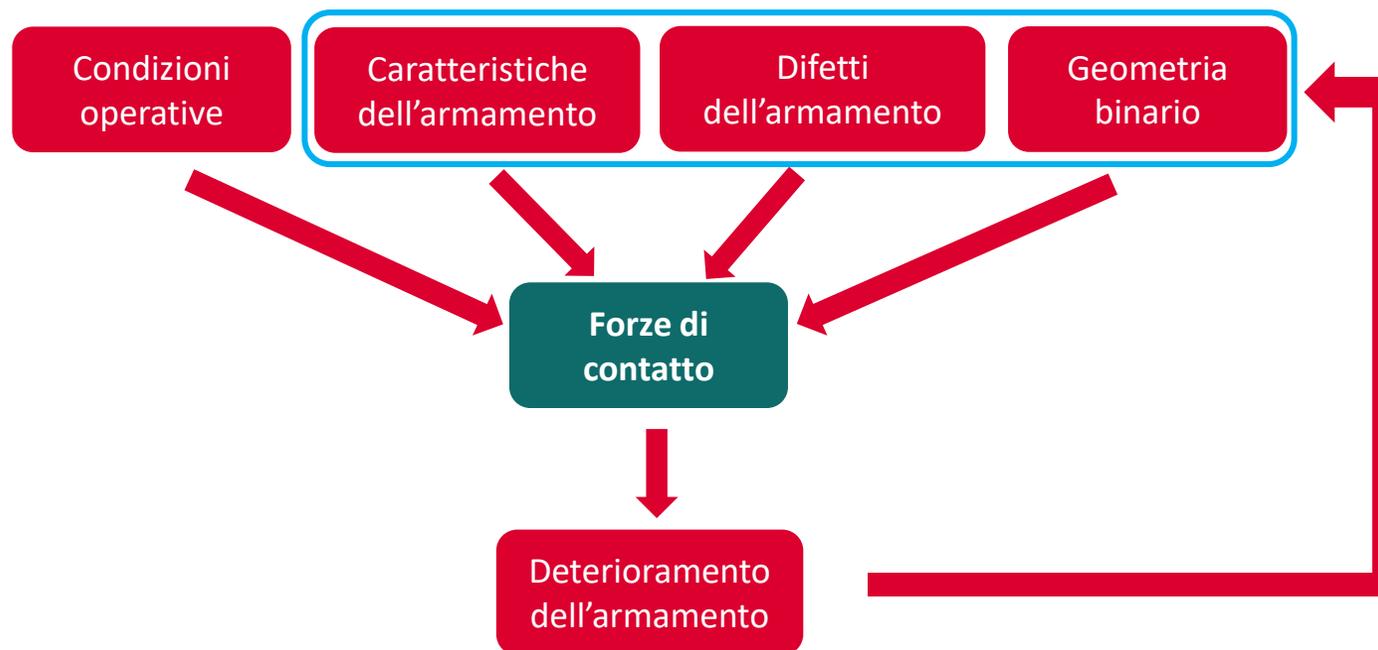
Conclusioni

- Il deterioramento colpisce tutti i componenti dell'armamento: rotaia, massicciata, geometria, giunti, attacchi ...
- Le forze di interazione ruota-rotaia sono responsabili di:
 - propagazione di tutte le tipologie di difetto
 - degrado dell'armamento nelle sue diverse componenti
- Sono quindi la chiave per comprendere le cause e le modalità di degrado dell'armamento.
- Le forze di interazione ruota-rotaia sono a loro volta influenzate da tutte le tipologie di difetto e per questo hanno il potenziale per:
 - Individuare molteplici tipologie di difetto, anche di lunghezza ben inferiore a 3 metri
 - Individuare le tipologie di difetto maggiormente impattanti sulla sicurezza
 - Prevedere l'evoluzione del degrado dei diversi componenti dell'armamento
- L'analisi bibliografica e le analisi preliminari sui dati confermano le potenzialità delle forze di interazione ruota-rotaia come elemento importante per lo sviluppo della diagnostica e della manutenzione dell'armamento.
- La misura contestuale di forze di interazione ruota-rotaia e geometria del binario capillarmente nello spazio e nel tempo possibile grazie alla nuova flotta diagnostica RFI offre un database unico di conoscenza
- Le capacità computazionali e tecnologiche attuali aprono scenari innovativi attraverso l'utilizzo di big data, già vi sono evidenze di studi a riguardo.

...e sviluppi futuri

La possibilità di guidare, attraverso una conoscenza unica, lo sviluppo futuro della diagnostica e della manutenzione dell'armamento

- Con le forze di contatto ruota-rotaiia potremo avere:
 - Uno strumento di diagnosi potente
 - La chiave per predire la comparsa di futuri difetti
 - Le informazioni necessarie alla definizione di una normativa più efficace



GRAZIE PER L'ATTENZIONE