



## Impatto del controllo di trazione e frenatura sul comportamento dinamico del veicolo ferroviario

Naim Kuka, Caterina Ariaudo, **Riccardo Verardi**: Railway Dynamics - ALSTOM

Innovazione e Sperimentazione sul Contatto Ruota-Rotaia - FAIVELEY/CIFI  
Roma 15 Ottobre 2019

**ALSTOM**  
*Designing fluidity*

# SOMMARIO

---

- 1 Motivazione**
- 2 Obiettivi**
- 3 Stato dell'arte in Alstom sullo studio della Driveline**
- 4 Metodologia di co-simulazione ad anello chiuso**
  - Modello meccanico
  - Contatto ruota/rotaia
  - Modello delle linee di alimentazione CC e CA
  - Controllo anti-slittamento/anti-pattinaggio
  - Modello di co-simulazione ad anello chiuso: Veicolo tipo EMU
- 5 Validazione del modello di co-simulazione**
- 6 Conclusioni e sviluppi**

# Motivazione: impatto della Drive-line sul sistema veicolo/via



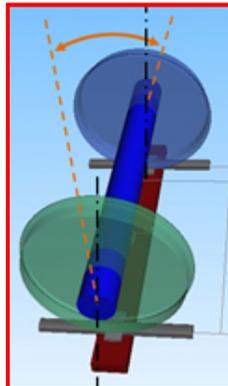
Cuscinetto motore



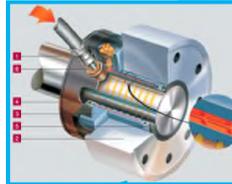
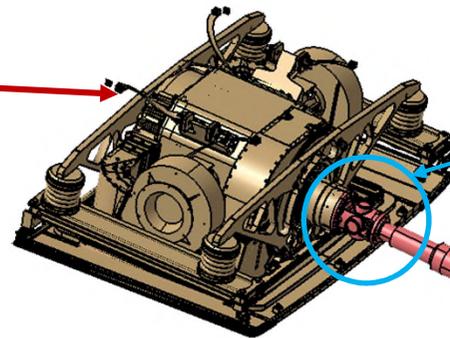
Rotture nei denti della corona



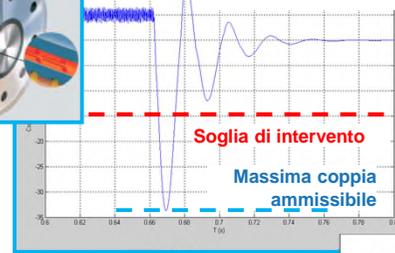
Piatti



Carichi e vibrazioni sugli assili (EN13103)

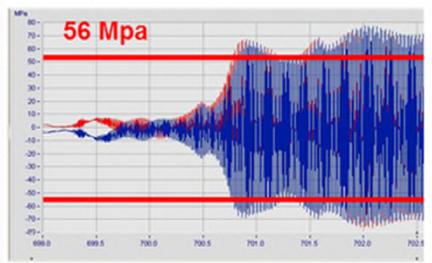


Coppia sulla Safe-set

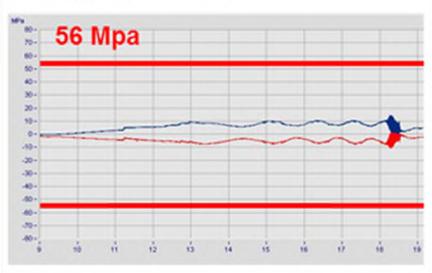


Sistema anti-pattinaggio

A-Type control



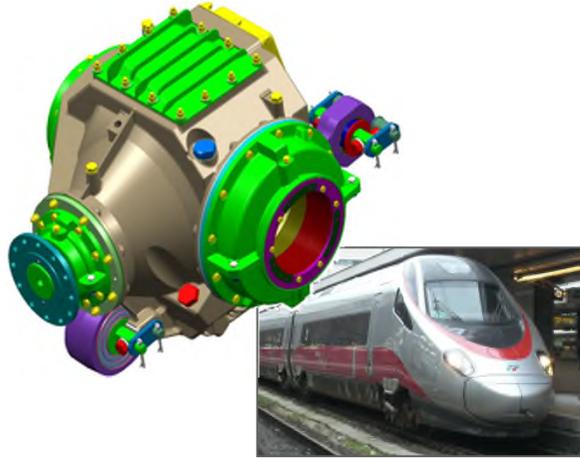
B-Type control



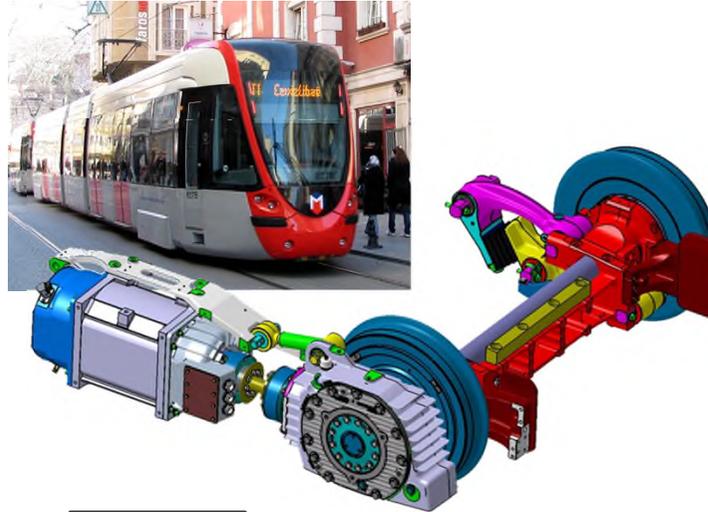
Studio dei fenomeni dovuti all'interazione tra il sistema elettrico e meccanico che possono produrre danni e/o sovraccarichi agli organi meccanici del carrello

# Diverse architetture - una sola metodologia

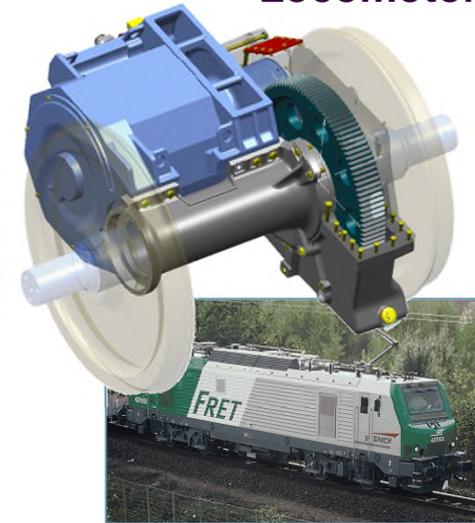
Treni ad alta velocità (EMU)



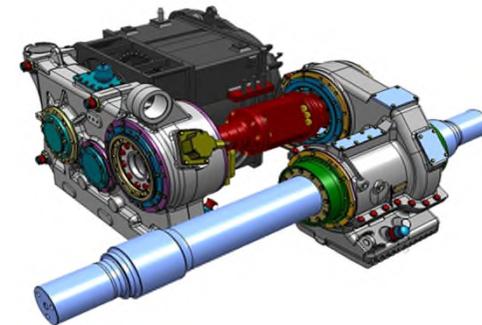
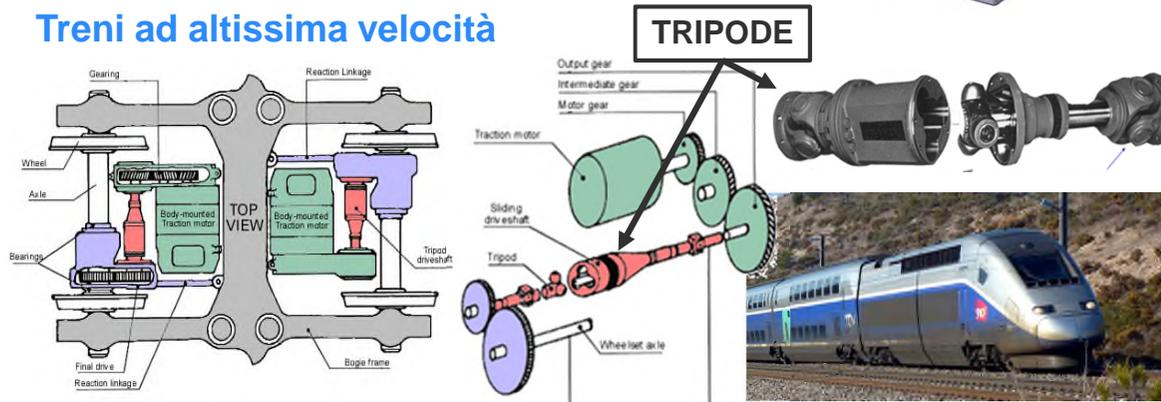
Tram



Locomotori



Treni ad altissima velocità



**OBIETTIVO** : Sviluppo di una metodologia unica applicabile a diverse soluzioni e per diversi scopi: dalla certificazione alla riduzione costi di sviluppo e LCC

Convegno FAIVELEY/CIFI Roma 15 Ottobre  
Innovazione e Sperimentazione sul Contatto Ruota-Rotaia – P4

© ALSTOM SA, 2015. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authorisation, is strictly prohibited.

**ALSTOM**

# Metodologie di analisi della Drive-line

## Da modelli indipendenti...

Storicamente, in Alstom, gli esperti meccanici ed elettrici hanno lavorato separatamente e hanno sviluppato i propri modelli in modo indipendente

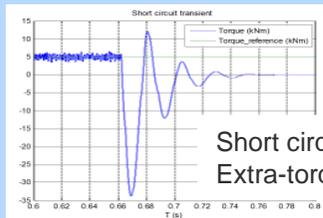
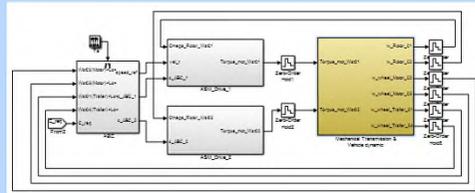
### Modello elettro-meccanico

(Simulink, SimulationX, Simplorer, ...):

- Modellazione dettagliata della parte elettrica (Traction + ABC)
- Modello meccanico semplificato (trasmissione, Inerzia, contatto ruota-rotaia)

### Modello SIMULINK

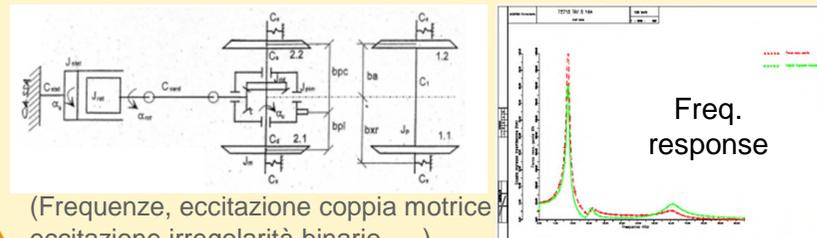
ABC Traction Mech



### Modello puramente meccanico

Azione del sistema elettrico introdotta come forza esterna

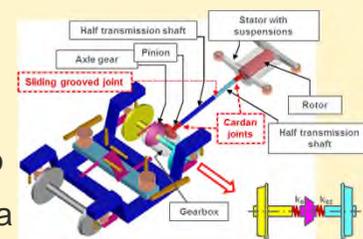
### Modello meccanico sviluppato In-house



### Modello MBS

(ADAMS, SIMPACK, Vampire)

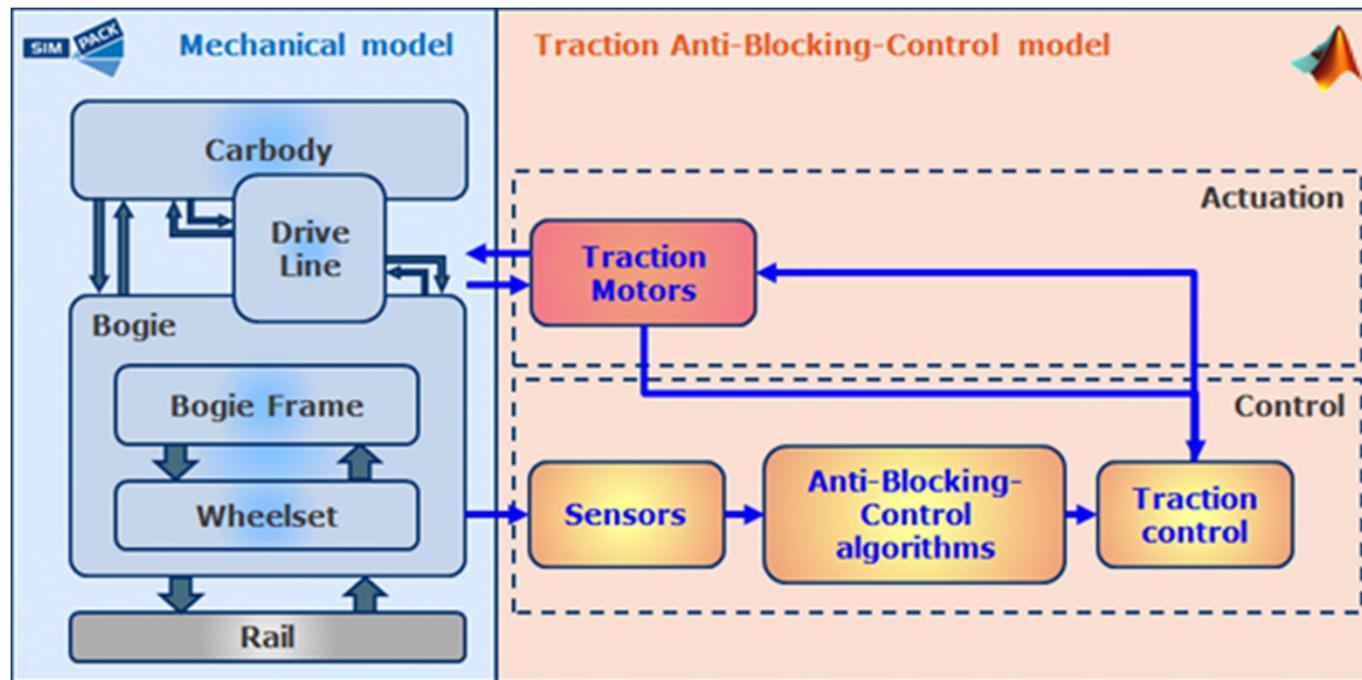
- Modello meccanico dettagliato
- Modello di contatto ruota/rotaia



Nessun feedback dal modello meccanico a quello elettrico (Open-loop)

# Metodologie di analisi della Drive-line ... alla Co-Simulazione

L'approccio basato sull'ingegneria di sistema e le crescenti esigenze del cliente in termini di prestazioni e LCC, impongono e rendono possibile lo sviluppo di strumenti di simulazione interdisciplinare



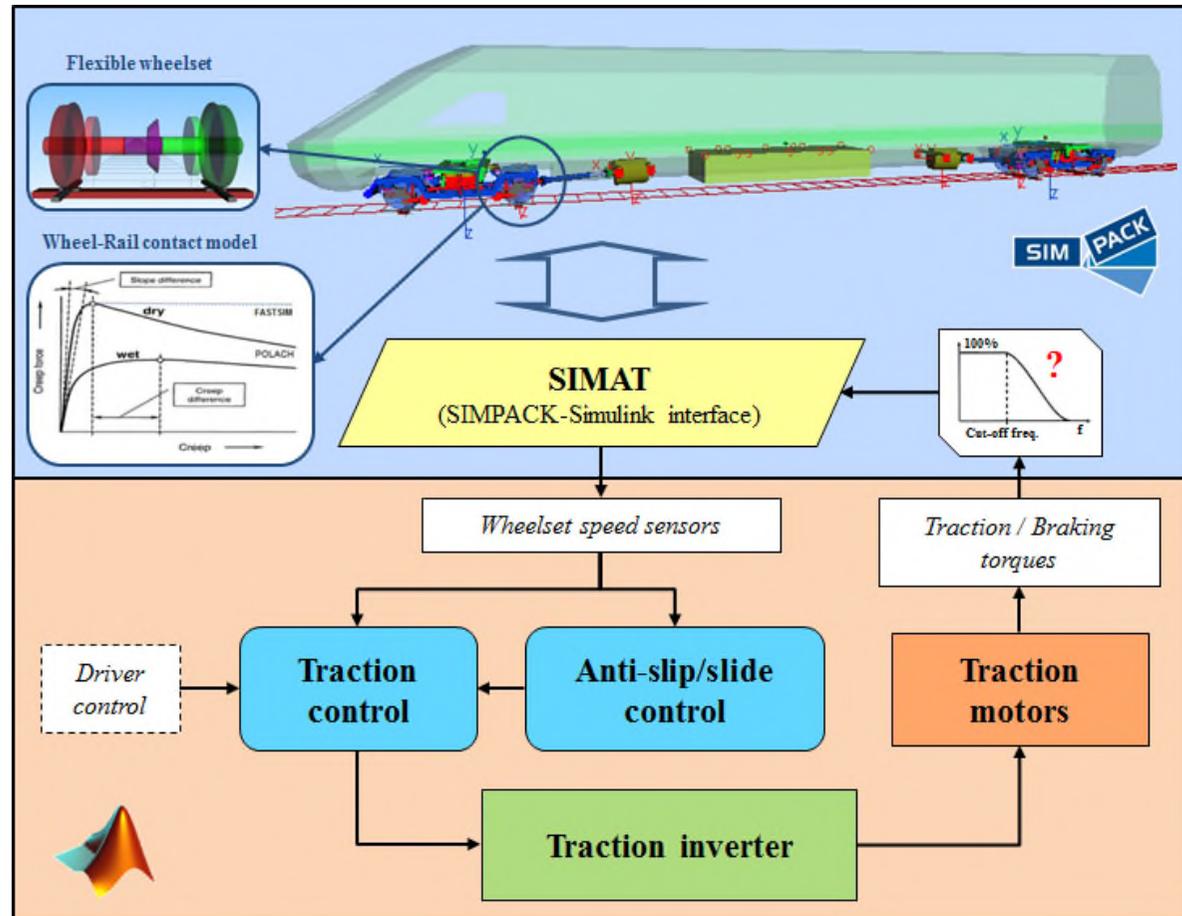
**Co-simulazione: utilizzo in Closed Loop di strumenti specifici per le componenti elettriche e meccaniche, come Simulink e SIMPACK**

# Modello di Co-simulazione ad anello chiuso in SIMPACK-Simulink

## Panoramica e obiettivi

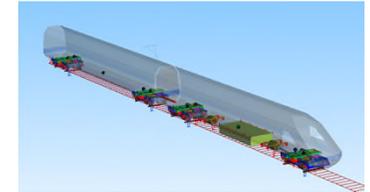
### Co-simulazione significa:

- **Modello MBS SIMPACK:** componenti meccanici della drive-line, sala flessibile e modelli specifici di contatto ruota-rotaia
- **Modello elettrico Simulink**
- **Interfaccia SIMAT** per la co-simulazione, che consente a ciascun modulo di utilizzare il proprio solver e il proprio passo di integrazione
- **Ottimizzazione** in termini di tempo e potenza di calcolo, rappresentatività del modello e degli output (range di frequenze)

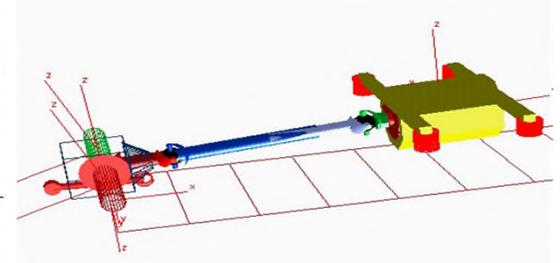
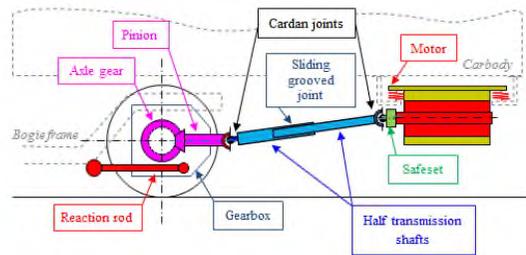


Simulazione in Closed-Loop : FEEDBACK tra modello meccanico ed elettrico

# Modello meccanico del veicolo

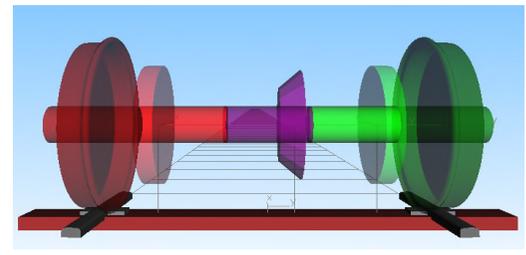
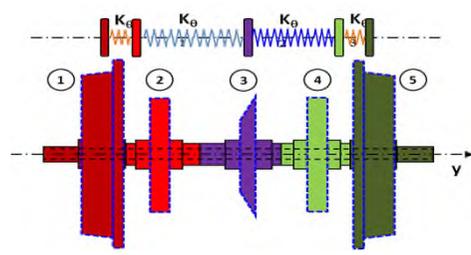


**Trasmissione:** 8 masse concentrate (corpi rigidi) connessi da elementi di forza (rigidezze, smorzamenti, attrito)



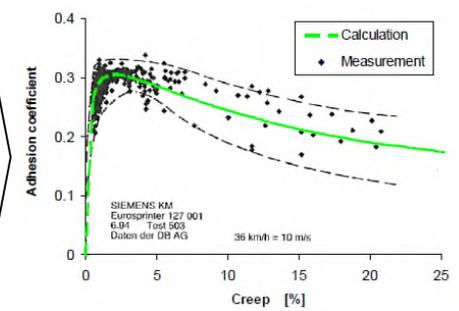
**Sala motrice:**

- 5 masse concentrate** collegate da rigidezze torsionali equivalenti
- Assile flessibile** modellato con l'elemento SIMBEAM



**Contatto ruota-rotaia:**

- Modello di Polach:** adatto a condizioni di contatto con elevati valori di creepage (dettagli nel seguito)
- Rigenerazione dell'aderenza:** è possibile simulare questo fenomeno, mediante una user-subroutine, che estende la legge di contatto di Polach



**Il modello può essere utilizzato per studiare il comportamento dinamico globale, inclusi i carichi sui componenti**

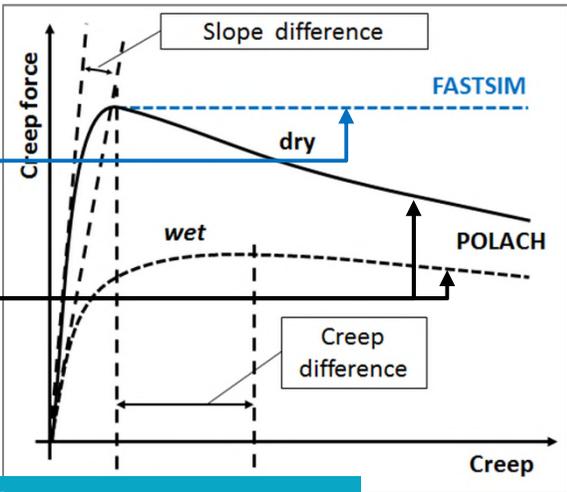
# Modello del contatto ruota-rotaia

Calcoli standard: creepage piccolo → modello di **Kalker (FASTSIM)**

Calcoli dinamici di Driveline: creepage elevato → modello di **Polach**

$$\mu = \mu_0[(1 - A)e^{-B\omega} + A] \quad F = \frac{2Q\mu}{\pi} \left( \frac{k_A \varepsilon}{1 + (k_A \varepsilon)^2} + \arctan(k_S \varepsilon) \right) \quad \text{con } \varepsilon = \frac{2 C \pi a^2 b}{3 Q \mu}$$

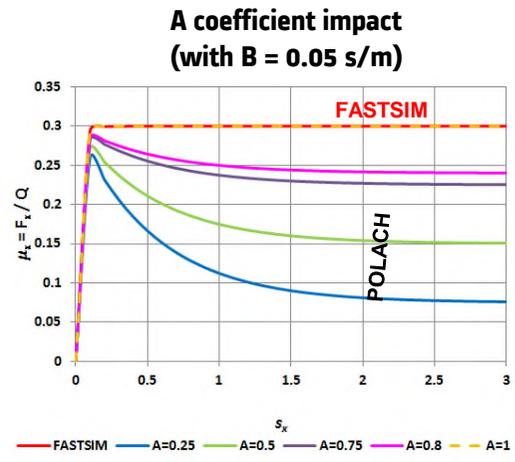
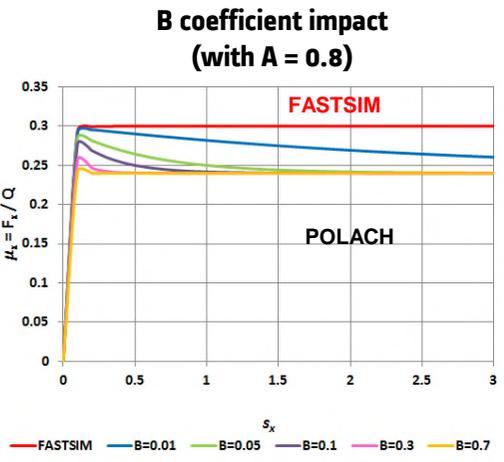
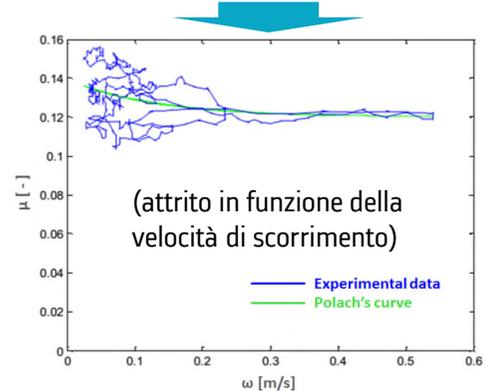
(legge dell'aderenza) (Forze di contatto tangenziali)



**Parametri A e B:**

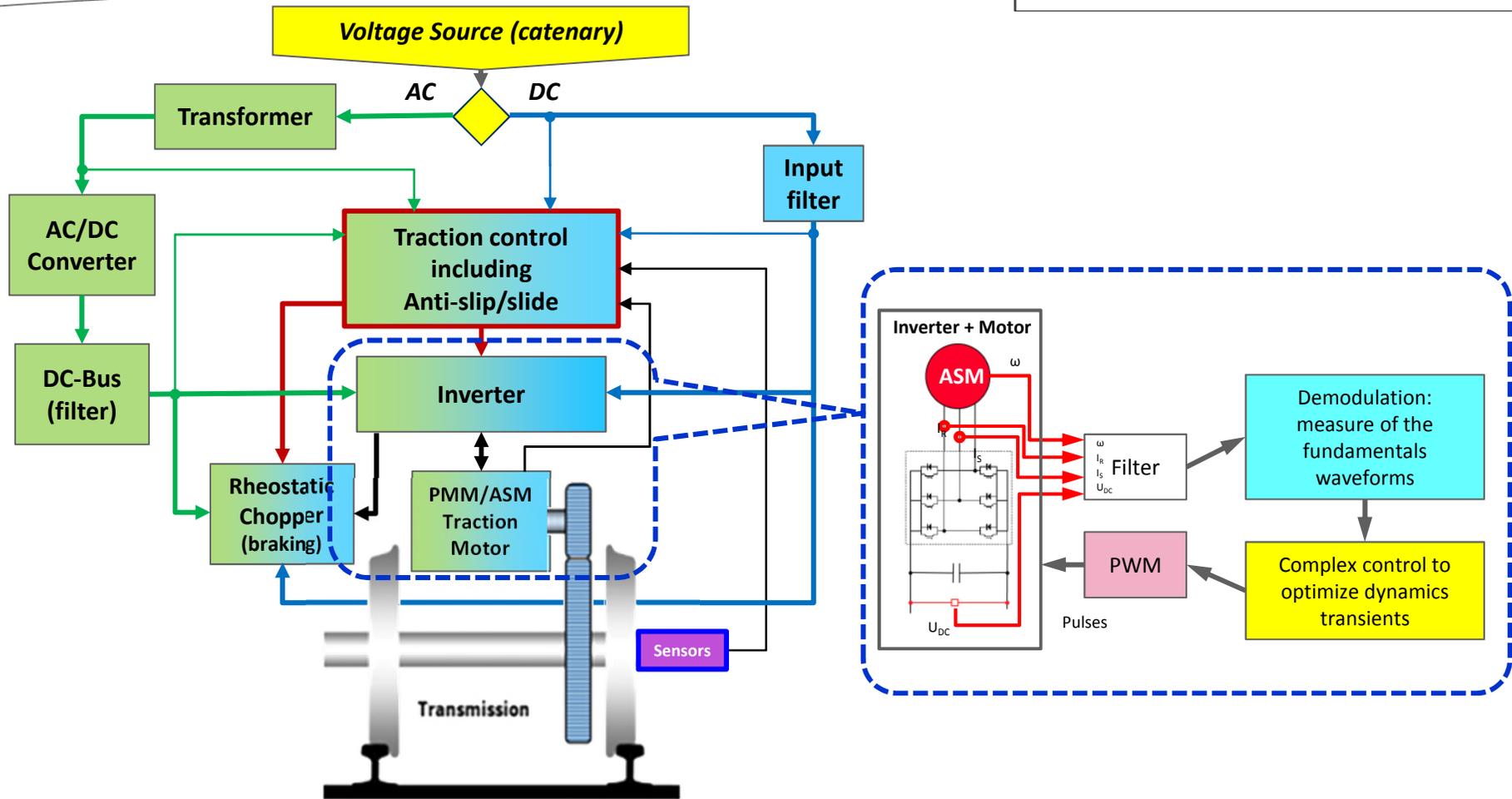
- **Impatto rilevante sulla legge di aderenza**
- **Identificazione effettuata principalmente per via sperimentale** (Levenberg-Marquardt Algorithm)

Un'analisi parametrica e di sensibilità può aiutare ad ottenere una risposta del veicolo più vicina alla realtà (a causa della difficoltà di determinare i coefficienti di Polach)



**Il modello di Polach consente di simulare il contatto ruota-rotaia con elevati valori di creepage, come richiesto dalle simulazioni di dinamica della drive-line, ma richiede dati sperimentali**

# Modelli delle linee di alimentazione CC e CA

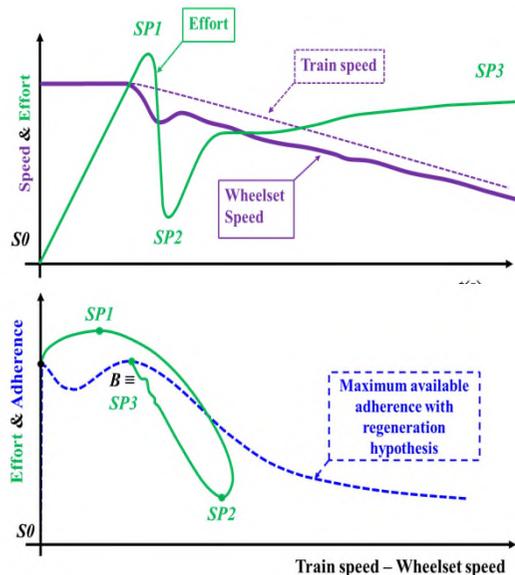
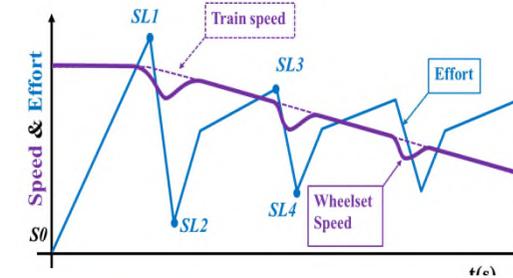


I modelli di co-simulazione raggiungono il livello di dettaglio desiderato: da modelli puramente funzionali fino a modelli completi, realistici ed affidabili

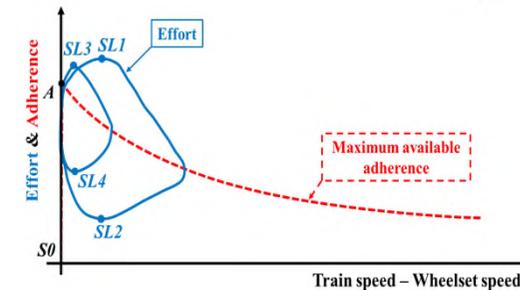
# Controllo anti-slittamento/anti-pattinaggio (ABC-Anti Blocking Control)

**Minimizzare lo slittamento** per rimanere nell'ambito dei micro slittamenti:

- il rilevamento dello slittamento è il più veloce possibile
- lo sforzo di frenatura (curva azzurra) viene rapidamente ridotto per annullare lo slittamento
- lo sforzo viene quindi aumentato per operare nuovamente nella zona di micro-slittamento (punto A)



il controllo **ABC** mira a mantenere lo sforzo al limite di aderenza mediante soglia di velocità, accelerazione e jerk

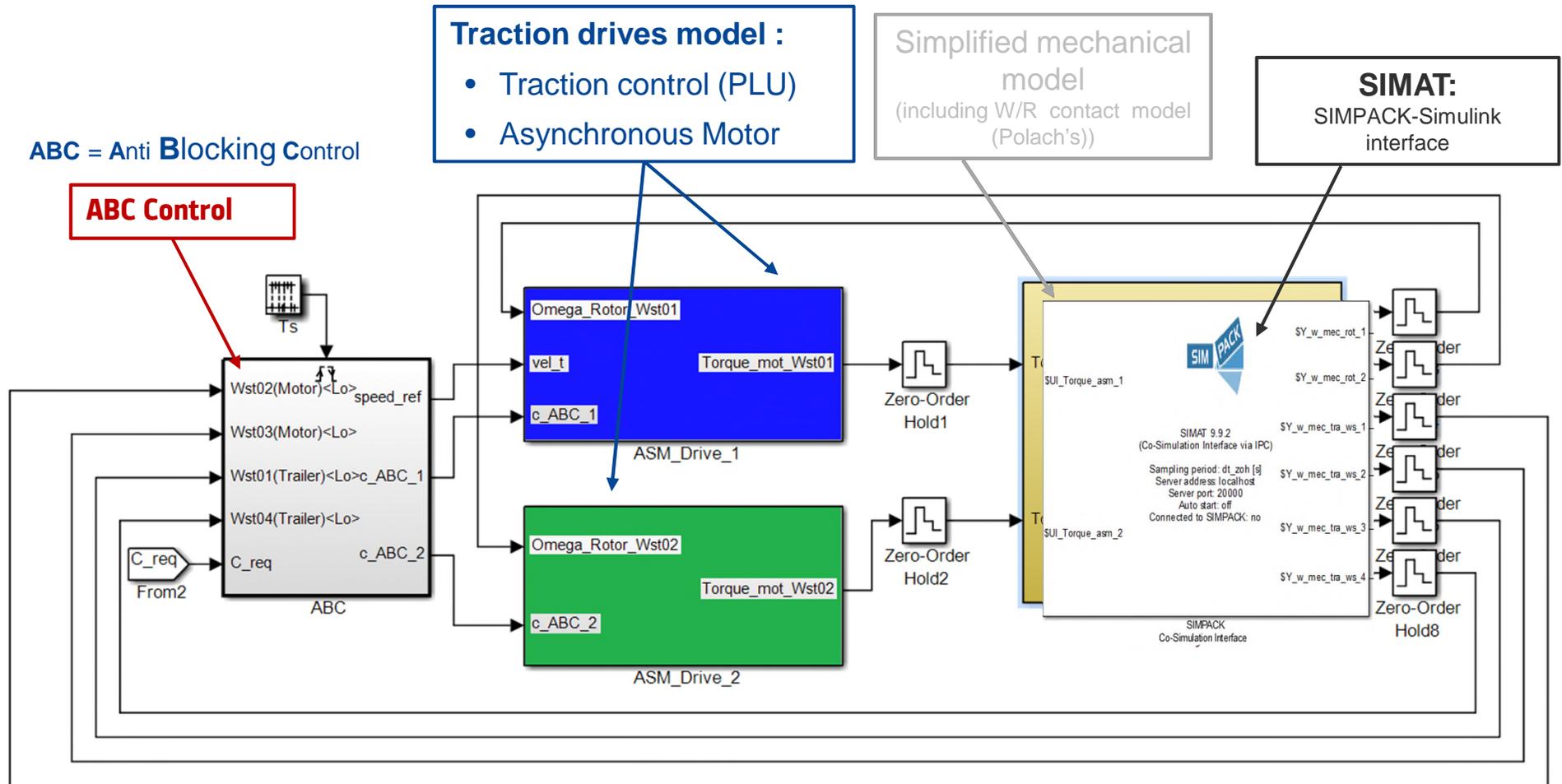
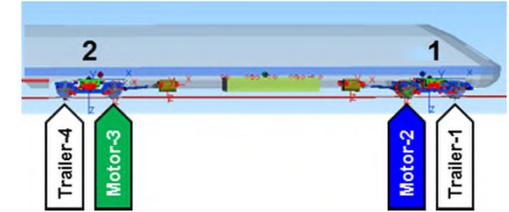


**Mantenere lo slittamento entro un valore costante**, controllando lo sforzo di frenatura (curva verde), in modo che sia raggiunto il massimo valore di aderenza (punto B).

**Due approcci per ottimizzare sia l'efficienza di trazione / frenatura sia il comportamento dinamico**

# Modello di co-simulazione ad anello chiuso

## Veicolo tipo EMU



Questo schema può essere applicato a tutti i veicoli motori

# Validazione del modello di co-simulazione

1. Validazione funzionale del **modello indipendente elettro-meccanico Simulink** della drive-line

2. Validazione del modello **SIMPACK del veicolo** dal punto di vista della dinamica di marcia convenzionale

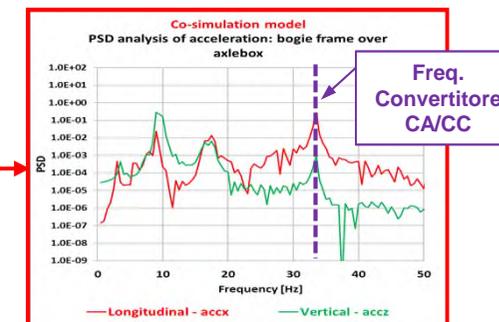
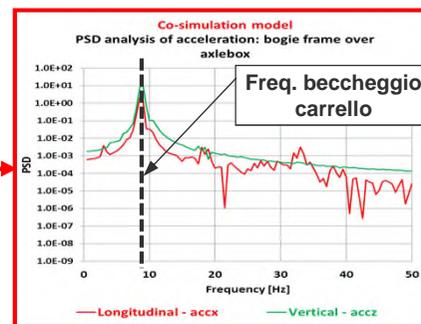
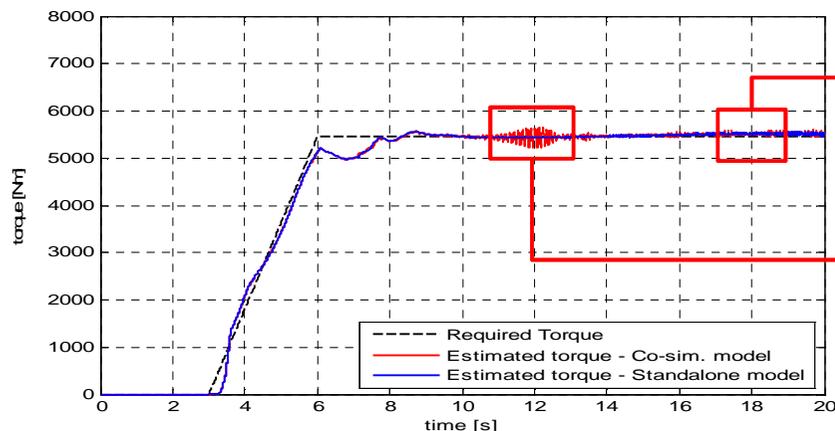
3. Validazione del modello di **co-simulazione SIMPACK/Simulink** effettuata confrontando i risultati della simulazione con i dati misurati durante le prove sul campo:

- **Carichi sui componenti della drive-line**, generati dalle eccitazioni della coppia del motore, in condizioni operative normali e degradate
- **Oscillazioni torsionali delle sale** e valutazione delle forze di contatto ruota-rotaia aggiuntive, dovute al controllo anti-slittamento/pattinaggio
- **Vibrazioni del carrello e del veicolo** indotte dalla drive-line

# Validazione: modello di co-simulazione vs. modello indipendente

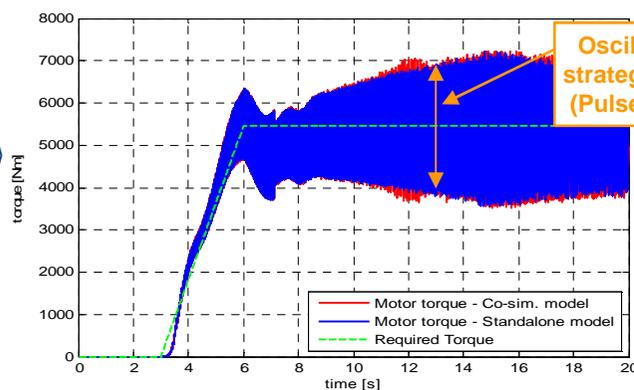
	SIMPACK	SIMULINK	SIMAT
$\Delta t$ [s]	$\leq 1.0e-4$	$\leq 1.0e-4$	$1.0e-4$

## Coppia motore richiesta (riferimento) e coppia stimata

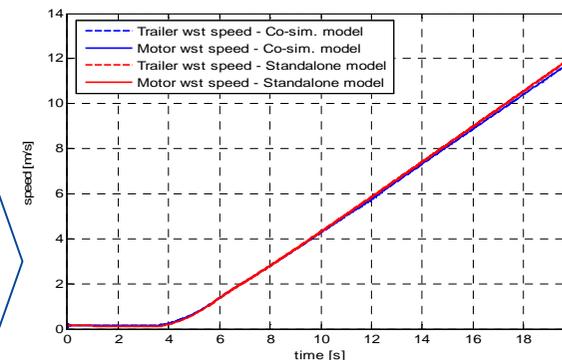


Coefficiente d'attrito  
Ruota/Rotaia  $\mu = 0.4$

Coppia richiesta e coppia elettromeccanica al motore



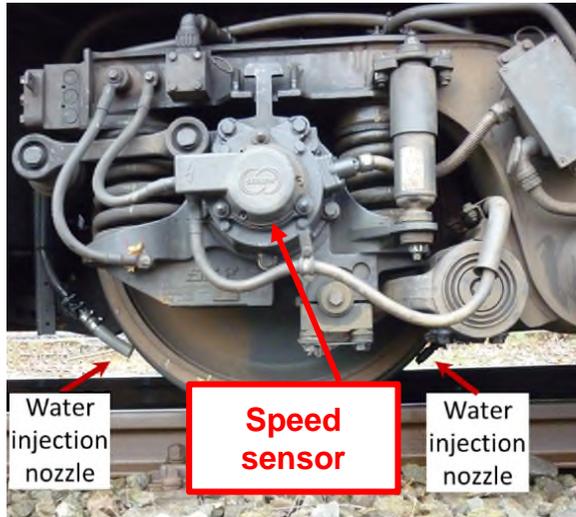
Velocità delle sale motrice e portante



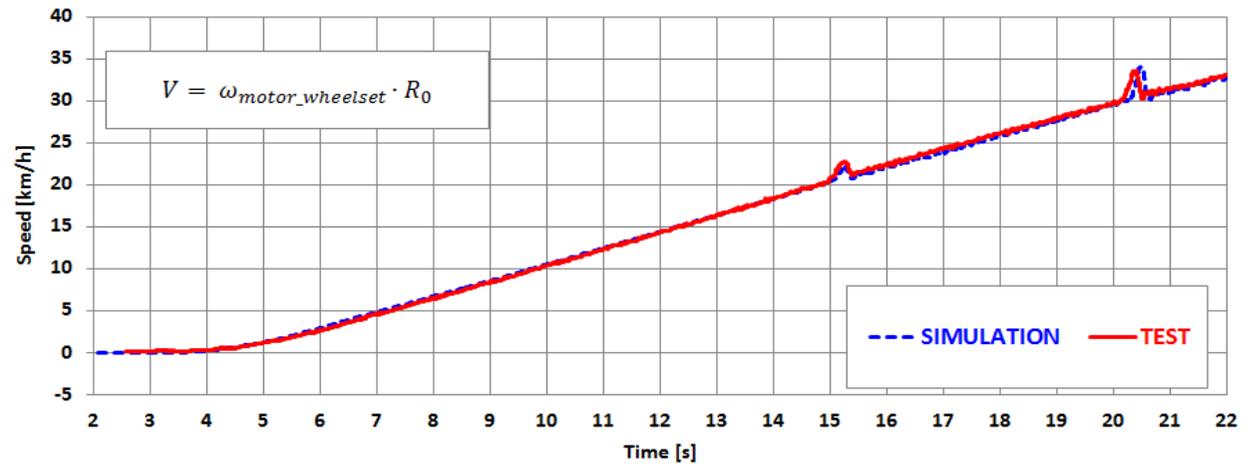
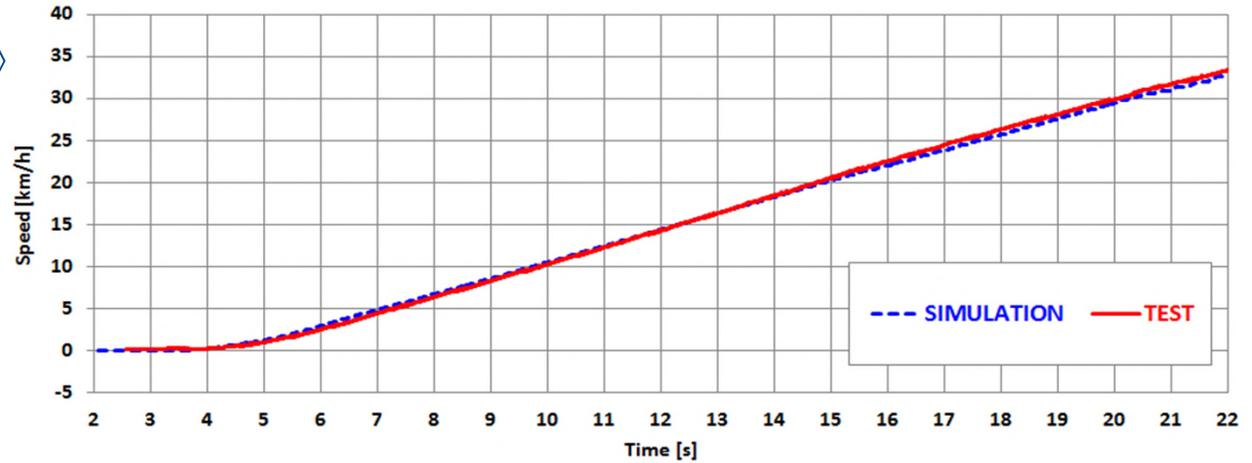
Buona corrispondenza tra i modelli indipendenti e di co-simulazione  
Il modello di co-simulazione fornisce ulteriori informazioni sulla risposta dinamica del veicolo

# Validazione: risultati di co-simulazione vs. risultati delle prove

Velocità di riferimento del veicolo (TWS)



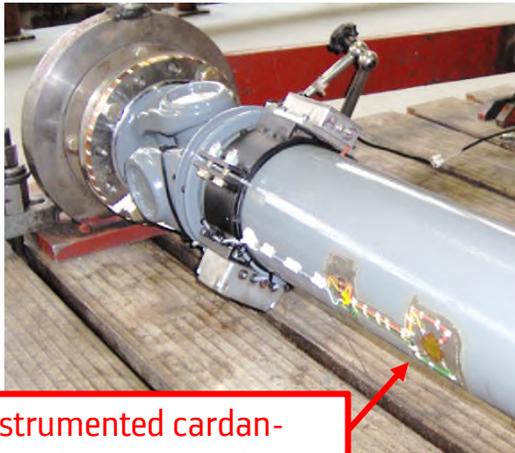
Velocità della sala motrice (MWS)



Condizioni di binario bagnato

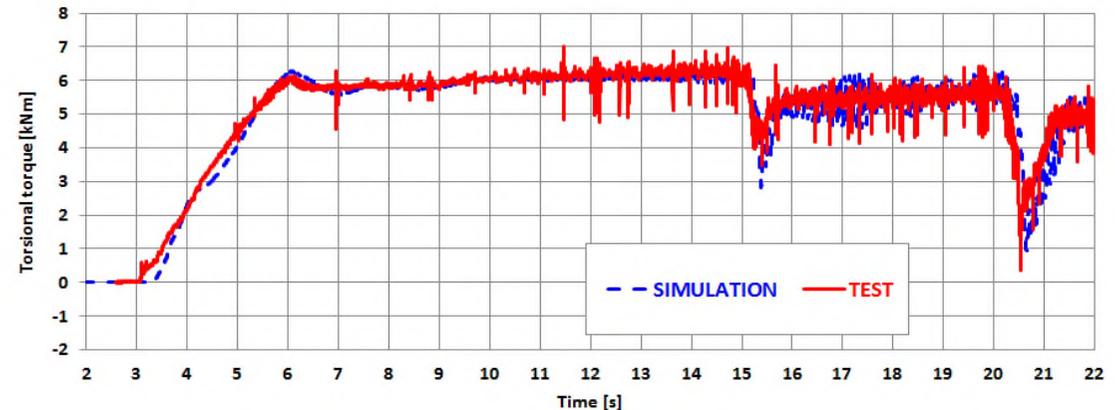
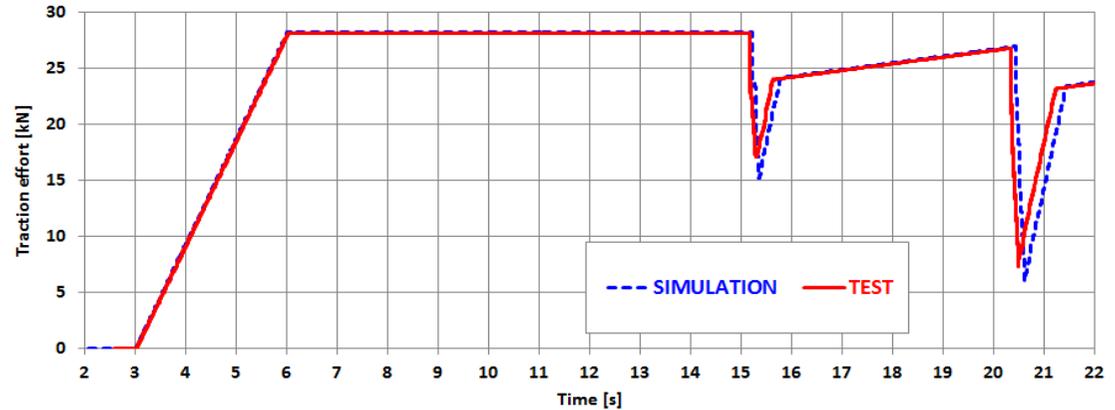
# Validazione: risultati di co-simulazione vs. risultati delle prove

Sforzo di trazione modulato dal controllo ABC



Instrumented cardan-shaft (strain gauge)

Coppia torsionale nell'albero di trasmissione

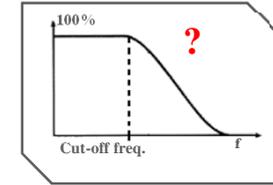


A livello globale simulazioni e prove presentano una buona corrispondenza

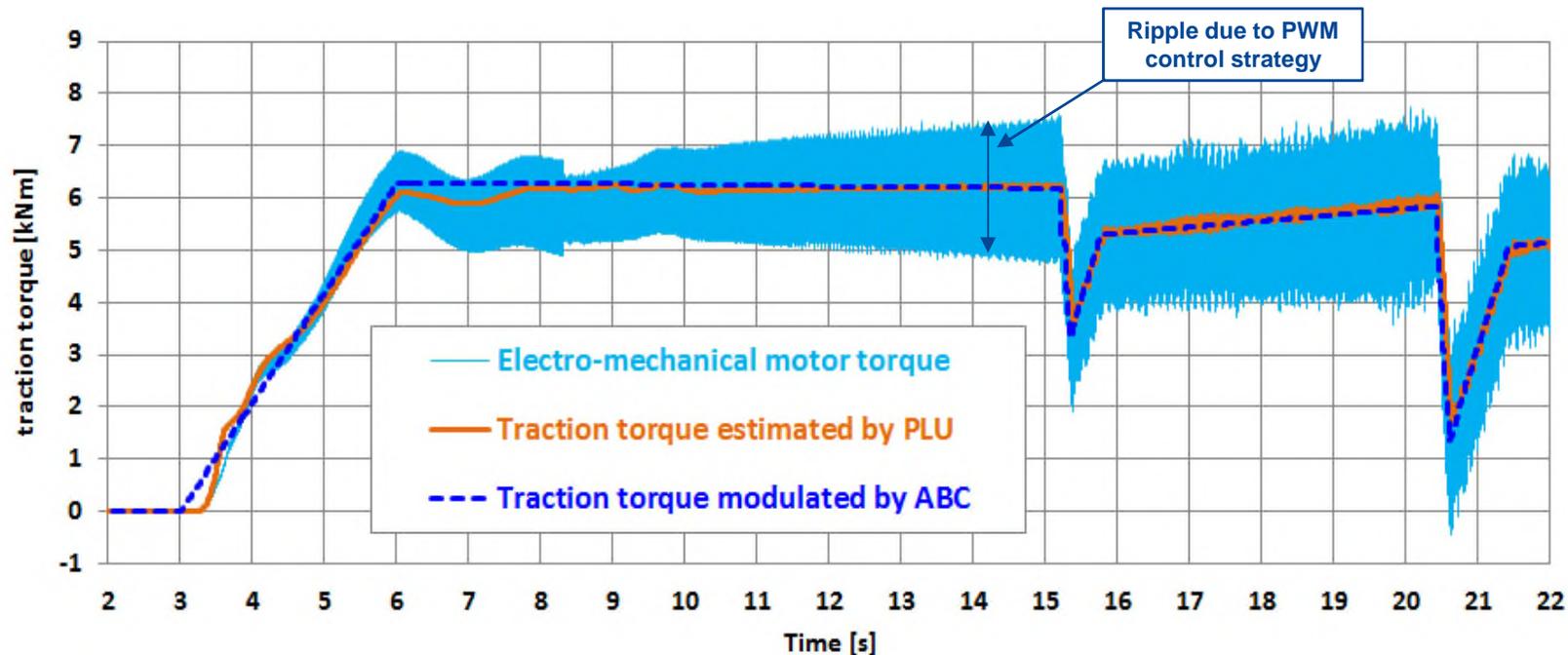
Ipotesi sulle condizioni di contatto ruota-rotaia e disturbi nel segnale misurato giustificano differenze nei valori di picco

# Co-simulazioni ad anello chiuso

## Fenomeni ad alta frequenza (ripple) osservati nelle simulazioni



Il **oscillazione (ripple) della coppia elettro-meccanica** è caratterizzato da componenti ad alta frequenza (300÷1000Hz) che potrebbero causare problemi di integrazione numerica



Le componenti ad alta frequenza dell'ondulazione sono generalmente filtrate dal modello meccanico, come accade nel veicolo reale, e quindi non creano problemi

Compatibilmente con l'obiettivo della simulazione, una soluzione alternativa potrebbe essere l'applicazione di un filtro passa-basso sull'output del modello Simulink

# Conclusioni e ringraziamenti

- In ambito Alstom è stata creata e validata una metodologia per la co-simulazione della drive-line in SIMPACK-Simulink, grazie a un approccio interdisciplinare che coinvolge esperti di dinamica ferroviaria e trazione
- Tale metodologia, applicabile a tutte le architetture di veicolo e di drive-line, è stata validata confrontando i risultati delle simulazioni con i risultati dal campo, in diverse condizioni operative
- La metodologia di co-simulazione consente di effettuare indagini su:
  - **Carichi sui componenti** della trasmissione, generati dalle forme d'onda della coppia del motore, a seconda delle strategie PWM adottate;
  - **Oscillazioni torsionali** delle sale e valutazione delle forze di contatto ruota-rotaia dovute all'ABC
  - **Vibrazioni** del carrello e del veicolo indotte dalla drive-line
  - Impatto del controllo **ABC** sul degrado delle prestazioni dei componenti meccanici

Si ringraziano tutti i colleghi Alstom che hanno collaborato allo sviluppo di questa metodologia, in particolare l'ing. **Andrea Dolcini**, per il determinante contributo nella realizzazione e validazione del modello della catena di trazione in Simulink e nella messa a punto del modello di co-simulazione

# Grazie per l'attenzione



[www.alstom.com](http://www.alstom.com)

Convegno FAIVELEY/CIFI Roma 15 Ottobre  
Innovazione e Sperimentazione sul Contatto Ruota-Rotaia – P19

© ALSTOM SA, 2015. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authorisation, is strictly prohibited.

**ALSTOM**  
*Designing fluidity*  
**ALSTOM**