POSITION PAPER TECNICO

# Analisi delle Forze di Stabilità in Curva su Tracciati Montani:

## Confronto tra Sistema con Respingenti e Digital Automatic Coupler (DAC)

**Antonio Lucisano**

Marzo 2026 | Documento Tecnico Indipendente | Versione 2.0

*Con riferimento alle reti ferroviarie alpine europee*

**SINTESI ESECUTIVA**

Il presente documento analizza il meccanismo fisico attraverso il quale i respingenti laterali dei carri merci ferroviari contribuiscono alla stabilità del convoglio in curva, generando una **coppia stabilizzante passiva**. Tale meccanismo è strutturalmente assente nel sistema DAC (Digital Automatic Coupler).

La versione 2.0 del documento — qui integralmente presentata — estende l'analisi al caso della **marcia normale su tratti montani con successione di curve**. In tale condizione il problema è continuo, strutturale e ***non compensabile dalla frenata elettronica***, che non può generare la coppia stabilizzante locale prodotta dai respingenti.

*Il documento è proposto come contributo tecnico indipendente all'attenzione delle autorità di sicurezza ferroviaria competenti, con particolare riferimento alle reti alpine europee.*

## 1. Premessa e Contesto

Il programma europeo di migrazione al Digital Automatic Coupler (DAC) prevede la conversione di circa 500.000 carri merci circolanti in Europa, con implicazioni economiche, operative e di sicurezza di primaria importanza.

Il presente documento propone un'analisi fisica dei meccanismi in gioco, estendendo l'analisi all'importante caso della marcia normale su tracciati montani, identificato come scenario di rischio primario per gravità e frequenza di occorrenza.

**⚠ INTEGRAZIONE CRITICA RISPETTO ALLA VERSIONE PRECEDENTE**

L'analisi originale (v1.0) si concentrava sulla frenata in curva. Questa versione estende il campo al caso della **marcia normale su tratti montani**, uno scenario più grave perché:

- Si verifica continuamente lungo tutto il percorso, non solo in frenata
- La frenata elettronica (EPC/EBA) è strutturalmente incapace di compensarlo
- Interessa direttamente i principali assi merci alpini europei

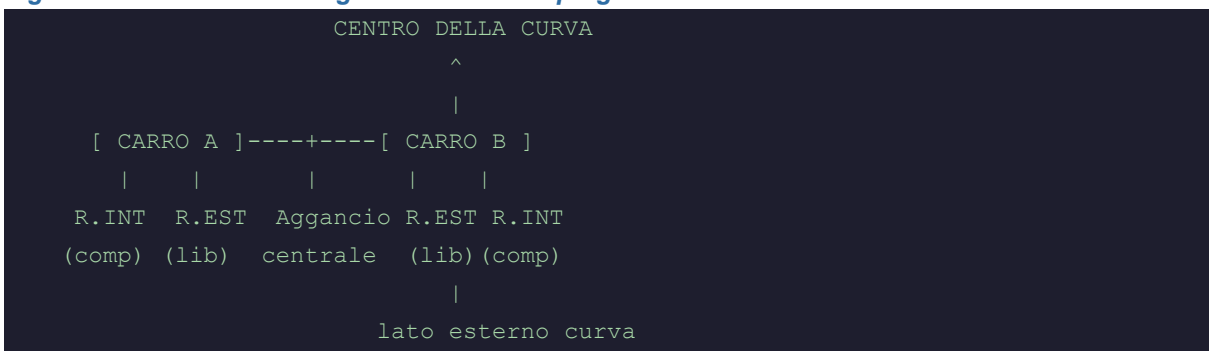
## 2. Analisi delle Forze con Sistema a Respingenti

## 2.1 Geometria in curva tra carri adiacenti

Percorrendo un tratto curvilineare, due carri adiacenti formano un angolo relativo attorno al punto di aggancio centrale. In questa configurazione:

- Il respingente sul lato interno della curva risulta maggiormente compresso, poiché le testate dei due carri si avvicinano su quel lato.
- Il respingente sul lato esterno risulta meno compresso o in condizione di minor contatto.

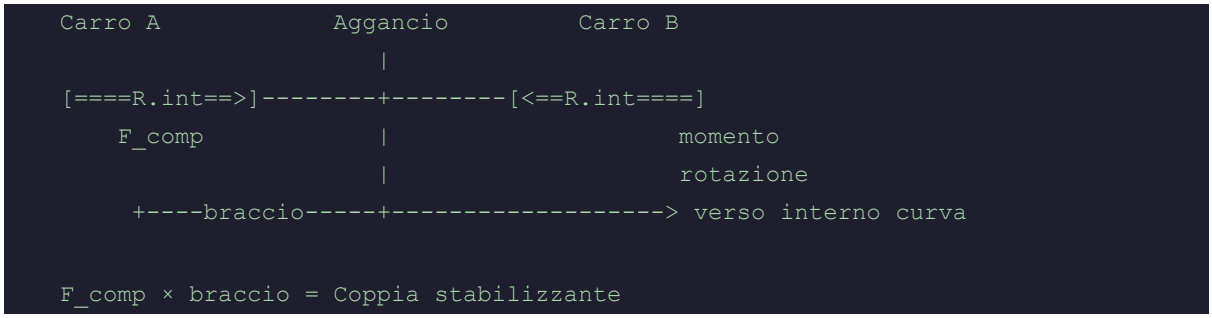
***Figura 1 — Vista dall'alto: geometria dei respingenti in curva***




## 2.2 Generazione della coppia stabilizzante

La forza di compressione del respingente interno, applicata lateralmente rispetto al punto di aggancio centrale, genera un momento meccanico (coppia) attorno a tale punto. Questa coppia produce un'imbardata del carro successivo orientata verso l'interno della curva. L'effetto si propaga sistematicamente lungo l'intero convoglio.

***Figura 2 — Meccanismo della coppia stabilizzante***




## 2.3 Effetto in marcia normale

Crucialmente, la coppia stabilizzante si genera **passivamente ogni volta che il convoglio percorre una curva**, indipendentemente dalla frenata. Su tratti montani con successione ravvicinata di curve e controcurve, questo meccanismo opera in modo continuo e si adatta automaticamente a ciascuna variazione di direzione, *garantendo stabilità passiva senza alcun intervento attivo.*

## 2.4 Effetto in frenata

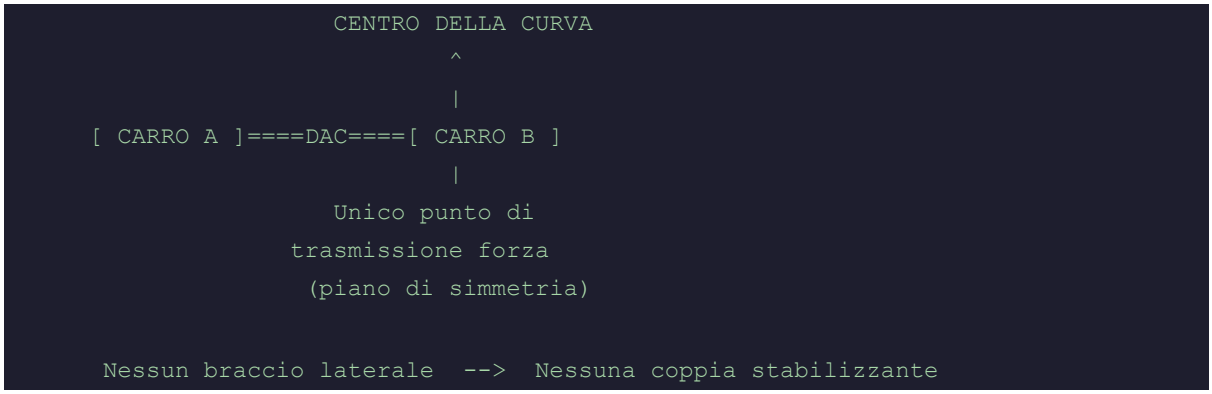
In condizioni di frenata, le forze di compressione tra i carri aumentano considerevolmente. L'incremento amplifica proporzionalmente la coppia stabilizzante, rendendo il meccanismo più efficace proprio nelle condizioni di maggior sollecitazione dinamica.

# 3. Analisi delle Forze con Sistema DAC

## 3.1 Geometria dell'aggancio centrale

Il sistema DAC trasmette tutte le forze attraverso un unico punto situato sul piano di simmetria longitudinale del carro. In curva la forza trasmessa attraverso il gancio ha una componente assiale e una componente trasversale.

***Figura 3 — DAC in curva: assenza di coppia stabilizzante***




## 3.2 Assenza strutturale della coppia stabilizzante

Poiché la forza si applica sul piano di simmetria del carro, il braccio del momento rispetto all'asse verticale è nullo o trascurabile. Di conseguenza, la coppia stabilizzante è **strutturalmente assente nel sistema DAC.**

Questa non è una limitazione correggibile con modifiche al gancio: è una conseguenza diretta e inevitabile della geometria di un aggancio centrale unico. *Nessuna variante di gancio centrale singolo può replicare l'effetto meccanico di due punti di contatto laterali con braccio rispetto all'asse del carro.*

## 3.3 Marcia normale in curva: scenario critico primario

L'assenza della coppia stabilizzante si manifesta durante qualsiasi percorrenza di un tratto curvilineo, non solo in frenata. Su tratti montani con molte curve, il convoglio DAC si trova sistematicamente privo del meccanismo di ricentramento per l'intera durata della traversata.

**NOTE — Perché la marcia normale è più critica della frenata**

In frenata di emergenza, la frenata elettronica sincrona (EPC) interviene tempestivamente. Nei tratti montani in marcia normale, invece:

- Le curve si susseguono continuamente per decine di chilometri
- Non è in corso alcuna frenata: i sistemi elettronici sono in modalità monitoraggio
- Il sistema DAC non ha alcun meccanismo passivo di ricentramento
- Le forze trasversali cumulative sui binari aumentano progressivamente
- La frenata elettronica differenziale non sostituisce una coppia stabilizzante geometrica

## 3.4 Perché la frenata elettronica non può compensare

La frenata elettronica differenziale (EPC/EBA) può modulare la frenata per carro o gruppo di carri in modo non sincrono. Tuttavia essa è strutturalmente inidonea a compensare il deficit del DAC per le seguenti ragioni:

- La frenata differenziale richiede il rilevamento di un'anomalia prima di intervenire: agisce in reazione, non in prevenzione.

- Su tratti montani, la geometria varia continuamente: il sistema di controllo dovrebbe disporre di informazioni geometriche locali per ogni gancio, non disponibili.
- La coppia stabilizzante dei respingenti è generata passivamente e istantaneamente da ogni curva; la frenata elettronica non ha questa proprietà di localizzazione e tempestività.
- Applicare frenata differenziale continua durante la marcia normale introdurrebbe usura anomala dei freni e perdita di controllo energetico del convoglio.
- La frenata differenziale è dimensionata per correggere anomalie, non per sostituire una funzione stabilizzante strutturale assente per centinaia di chilometri di tratto montano.

### 3.5 Comportamento in frenata in curva

A questo scenario si aggiungono i rischi già evidenziati in condizioni di frenata:

- La componente trasversale della forza al giunto angolato tende a spingere i carri verso l'esterno della curva, senza la coppia di contrasto dei respingenti.
- Le forze di compressione crescono cumulativamente verso la testa del treno, incrementando progressivamente il rischio di instabilità.
- L'effetto destabilizzante è proporzionale alla forza frenante, al numero di carri e all'inverso del raggio di curvatura.
- Il rischio di jack-knifing (effetto coltello) aumenta in assenza del meccanismo di ricentramento.

## 4. Scenario Montagna: Analisi Specifica

### 4.1 Caratteristiche dei tracciati montani

I principali assi merci transalpini europei presentano caratteristiche che amplificano sistematicamente tutti i fattori di rischio:

- Raggi di curvatura ridotti (tipicamente 300–600 m sui tratti storici), che aumentano l'angolo relativo tra carri adiacenti e quindi la componente trasversale della forza al giunto DAC.
- Successione ravvicinata di curve e controcurve: il convoglio si trova raramente su tratto rettilineo per più di poche centinaia di metri.
- Pendenze significative (tipicamente 20–35‰) che aumentano le forze di compressione tra carri in discesa anche senza frenata attiva, amplificando le forze trasversali.
- Lunghe gallerie dove i cicli frenata-rilascio si moltiplicano.
- Convogli merci pesanti (fino a 2.000 t) e lunghi (fino a 750 m) che amplificano l'accumulo delle forze trasversali lungo la composizione.

### 4.2 Meccanismo cumulativo in discesa senza frenata attiva

Su un tratto in discesa con curvatura, anche in assenza di frenata attiva, la componente gravitazionale genera forze di compressione tra i carri. Con il sistema a respingenti, queste forze producono la coppia stabilizzante desiderata. Con il sistema DAC, producono componenti trasversali senza alcun momento ricentrante, distribuendosi in modo cumulativo lungo il convoglio.

La situazione peggiore si verifica in curva con pendenza: la forza gravitazionale e la curvatura **cooperano nel generare forze trasversali senza contrasto.**

**⚠ SCENARIO DI MASSIMO RISCHIO IDENTIFICATO**

- **Convoglio merci lungo (500–750 m) e pesante (>1.500 t)**
- **Su tracciato alpino in discesa con curvatura (R < 500 m, pendenza > 20‰)**
- Sistema DAC: nessuna coppia stabilizzante in nessun momento del percorso
- Frenata elettronica: non può generare la coppia stabilizzante mancante

- **Forze trasversali cumulative sui binari: potenzialmente superiori ai limiti di omologazione**

### 4.3 Linee alpine europee: implicazioni operative

Le seguenti linee presentano caratteristiche che le rendono particolarmente rilevanti per questa analisi:

- Linea del Gottardo (CH): tratti storici con raggi fino a 300 m e pendenze del 27‰; traffico merci intenso verso il porto di Genova.
- Brennero (AT/IT): curvatura media elevata sui tratti di accesso; traffico merci in forte crescita verso il corridoio Scandinavia-Mediterraneo.
- Sempione (CH/IT): caratteristiche simili al Gottardo; utilizzato da traffico merci pesante.
- Semmering (AT): tracciato storico UNESCO con curvatura accentuata e pendenze significative.
- Tauern (AT): tratto con successione di curve molto serrate.

La migrazione al DAC su queste linee, senza una valutazione esplicita del comportamento in marcia normale su curva, rappresenta un **rischio sistemico non gestibile con le sole contromisure elettroniche disponibili.**

## 5. Confronto Sintetico

| Parametro | Sistema con Respingenti | Sistema DAC |
|---|---|---|
| **Punti di trasmissione forza** | Due (laterali) | Uno (centrale) |
| **Braccio momento rispetto asse carro** | Presente (significativo) | **Assente o trascurabile** |
| **Coppia stabilizzante in curva** | Generata automaticamente | **Strutturalmente assente** |
| **Marcia normale su curve** | Coppia attiva in ogni curva | **Nessun contrasto — instabilità continua** |
| **Frenata in curva** | Coppia amplificata dalla frenata | **Forza destabilizzante cresce** |
| **Scenario montano (curve + pendenza)** | Meccanismo sempre attivo | **Peggioramento sistematico** |
| **Compensazione elettronica freni** | Non necessaria (meccanismo passivo) | **Inefficace su curve continue** |
| **Rischio jack-knifing** | Contrastato dalla coppia | **Non contrastato** |
| **Linee alpine europee** | Comportamento stabile | **Rischio sistematico non gestito** |

## 6. Implicazioni per la Sicurezza

L'analisi presentata suggerisce che i problemi del DAC in condizioni di curva abbiano una causa fisica strutturale, non contingente e non eliminabile con modifiche al gancio o con sistemi elettronici di compensazione. In particolare:

- Il meccanismo destabilizzante è sistematico e riproducibile, non casuale.
- Peggiora in modo prevedibile all'aumentare della lunghezza del convoglio, del carico, della pendenza e al diminuire del raggio di curvatura.
- Si manifesta durante l'intera traversata di tratti montani, non solo in frenata: la durata dell'esposizione al rischio è incomparabilmente maggiore rispetto allo scenario di frenata isolata.
- Non è eliminabile con modifiche al gancio centrale, essendo una conseguenza della geometria fondamentale del sistema.
- Non è compensabile dalla frenata elettronica differenziale, che non ha le proprietà geometriche, la localizzazione e la continuità operative necessarie.
- Interessa direttamente i principali assi merci transalpini europei, dove il traffico pesante è in crescita strutturale.

## 7. Raccomandazioni

Sulla base dell'analisi svolta, si raccomanda alle autorità competenti di:

- Verificare se le condizioni di marcia normale su tratti curvilinei montani siano state sistematicamente incluse nei protocolli di test del DAC europeo, distinte dalle prove di frenata d'emergenza.
- Richiedere ai proponenti del sistema DAC una modellazione dinamica esplicita del comportamento in curva durante la marcia normale, con quantificazione delle forze trasversali cumulative in funzione del numero di carri e del raggio di curvatura.
- Valutare l'introduzione di requisiti specifici di stabilità in curva — in marcia normale e in frenata — nei criteri di omologazione del DAC, con soglie differenziate per tratti montani.
- Considerare test comparativi diretti tra convogli con respingenti e convogli DAC su tracciati alpini reali (Gottardo, Brennero o equivalenti), documentando le forze laterali sui binari durante la marcia normale.
- Valutare se le linee alpine storiche con raggi di curvatura inferiori a 400–500 m richiedano un regime normativo specifico per la circolazione di convogli DAC lunghi e pesanti.
- Considerare una moratoria sulla migrazione DAC per le linee alpine fino al completamento di test appositamente progettati per lo scenario montano in marcia normale.

## 8. Nota Metodologica

La presente analisi è sviluppata a partire dai principi fondamentali della meccanica classica applicata alla dinamica ferroviaria. Non richiede dati riservati per essere valutata: chiunque disponga di competenza tecnica nel settore può verificarne la correttezza in modo indipendente.

L'analisi è proposta in buona fede come contributo tecnico al dibattito sulla sicurezza ferroviaria, nell'interesse pubblico e nella piena consapevolezza delle rilevanti implicazioni economiche del programma DAC europeo, che non devono tuttavia prevalere sulle valutazioni di sicurezza.

**Antonio Lucisano**

*Documento Tecnico Indipendente — Marzo 2026 — Versione 2.0*