

Coordinato da:



MINISTERO  
DELLE INFRASTRUTTURE  
E DEI TRASPORTI

Organizzato da:

*in qualità di Provider*



*evento realizzato in collaborazione con*

ASSOCIAZIONE ITALIANA  
per l'INGEGNERIA  
del TRAFFICO  
e dei TRASPORTI



## Area Tematica – INNOVAZIONE TECNOLOGICA

### ABSOLUTELY BETTER JOINT, L'INNOVAZIONE NEL CAMPO DEI GIUNTI ISOLANTI INCOLLATI

Gianluca Megna<sup>1</sup>, Andrea Bracciali<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Firenze

<sup>2</sup> AB Consulting, Firenze

Contatti: 348 2856982, [gianluca.megna@unifi.it](mailto:gianluca.megna@unifi.it)

#### 1. Introduzione

Il livello di automazione della marcia e della condotta dei veicoli ferroviari può essere descritto tramite cinque livelli (Grade Of Automation, GOA in breve) che passano dalla marcia a vista (GOA0) alla marcia completamente automatica, cioè senza conducente e non presenziata (GOA4). La descrizione di tali livelli è mostrata in **Figura 1**. I sistemi ATO (Automatic Train Operation) di molte metropolitane anche italiane (Metro Brescia, Roma Metro C, Milano Linea 4 e 5) fanno parte del livello più alto di automazione.

Grade of automation	Train operation	Setting the train in motion	Driving and stopping the train	Opening and closing the doors	Operation in case of disruptions
<b>0</b> Line of Sight	Just the driver	Driver	Driver	Driver	Driver
<b>1</b> Non-automatic	ATP with a driver	Driver	Driver	Driver	Driver
<b>2</b> Semi-automatic	ATP and ATO with a driver	Driver Automatic	Automatic	Driver	Driver
<b>3*</b> Driverless	ATP and ATO without a driver	Automatic	Automatic	Driver Attendant	Attendant
<b>4</b> Unattended	ATP and ATO without a driver and attendant	Automatic	Automatic	Automatic	Automatic

\* Only applicable on passenger trains

Figura 1. Livelli di automazione della marcia dei veicoli ferroviari 0.

La marcia a vista, in cui il conducente non è coadiuvato da alcun sistema di protezione, è invece applicata solamente ai sistemi tranviari, mentre tutti gli altri sistemi ferroviari adottano almeno un livello GOA1, in cui è utilizzato un sistema ATP (Automatic Train Protection), in grado di applicare in modo automatico la frenatura di emergenza in caso di superamento della massima velocità di marcia, o dei segnali disposti a via impedita.

Questa soluzione è ancora la più utilizzata su gran parte delle linee convenzionali e delle metropolitane non automatiche, e il componente fondamentale per la realizzazione del distanziamento automatico dei veicoli rimane il Giunto Isolante Incollato (GII), in quanto permette la suddivisione della linea in sezioni di blocco, ognuna della quali non può essere occupata contemporaneamente da più veicoli. Il GII deve quindi isolare elettricamente due spezzoni di rotaia e allo stesso tempo deve resistere alle sollecitazioni meccaniche (provocate dal passaggio dei veicoli e dalla termica che binario) mantenendo così l'integrità strutturale della Lunga Rotaia Saldata (LRS).

Nella configurazione attuale del GII la perfetta continuità della rotaia non è comunque garantita. Infatti, indipendentemente dal numero di chiodi di bloccaggio (esistono GII con 8 chiodi come in **Figura 2** sinistra [2]) e dalla disposizione del giunto (sospesa od appoggiata su una traversa come in **Figura 2** destra), i GII sono infatti soggetti agli inevitabili urti derivanti dall'accostamento di due rotaie, le cui testate sono separate da una sagoma in nylon di spessore tipicamente pari a 5 mm.



Figura 2. GII con 8 chiodi di bloccaggio (sinistra), GII supportato da una traversa speciale (destra)

La letteratura tecnica è ricca di studi e ricerche che analizzano il degrado e la rottura, a volta repentina, dei GII a causa della loro architettura, ma nessuno di essi individua una soluzione definitiva per il problema. La rottura di un GII può avere conseguenze catastrofiche, come nel caso dell'incidente avvenuto a Pioltello il 25.01.2018, e le azioni mitigative attualmente adottate, come sensori per il monitoraggio dello scollamento o l'utilizzo di una traversa di appoggio speciale, sono solamente palliativi gestionali ma non rappresentano soluzioni tecniche nei riguardi del degrado dei GII.

Utilizzando rotaie ordinarie con un gambo relativamente sottile (16.5 mm per le rotaie 60E1), le soluzioni costruttive che prevedono angoli di taglio diversi da 90° con l'obiettivo di generare una transizione più morbida tra le rotaie, non permettono comunque di realizzare angoli inferiori a 30° in quanto si otterrebbero superfici non compatibili con la resistenza meccanica delle rotaie stesse. Il giunto IVB30 [5] è un esempio di questo tipo di giunti a taglio inclinato ed è descritto anche nei manuali di manutenzione di DB [6], di cui si riporta un estratto in **Figura 3** sinistra.

Soluzioni con angoli di taglio molto acuti sono realizzabili piegando preventivamente le rotaie, come avviene nella produzione dei giunti di dilatazione (**Figura 3** destra), oppure utilizzando rotaie laminate con profili con anima spessa. Profili di questo tipo sono descritti nella norma EN13674-2 [3] e sono destinati alla produzione della componentistica degli scambi, come ad esempio le barre per ago, le quali vengono fresate per ottenere il profilo dell'ago che si deve accoppiare con il contrago.

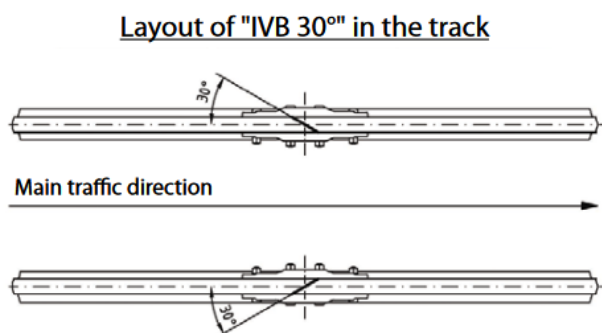


Figura 3. GII con taglio a 30° (sinistra), giunto di dilatazione ottenuto da rotaie piegate (destra)

Dato che l'ago deve traslare su dei cuscinetti, le barre per ago sono anche caratterizzate da un'altezza inferiore rispetto alla rotaia di riferimento e la transizione tra la sezione della barra e quella di riferimento viene realizzata tramite una forgiatura secondo la normativa EN16273 [4].

Le barre per ago presentano quindi un insieme di caratteristiche tali da rendere possibile lo sviluppo di un nuovo concetto di GII, le cui principali caratteristiche sono:

- un taglio molto acuto delle barre per ago che permette una transizione graduale tra i due spezzoni di rotaia collegati;
- l'eliminazione delle due ganasce laterali, sostituite da una piastra di spessore elevato posta sotto il piede delle barre per ago che supporta il giunto per l'intera lunghezza della transizione.

La combinazione di queste due caratteristiche ha permesso la realizzazione di un GII innovativo, denominato *Absolutely Better Joint* (ABJ), la cui architettura è tale da non generare urti e le conseguenti problematiche dei GII convenzionali. Il presente articolo descrive lo sviluppo dell'attuale configurazione dell'ABJ, fino agli ultimi test di laboratorio effettuati per la verifica delle prestazioni in accordo a diverse normative nazionali ed internazionali.

Dopo il concepimento dell'idea (2021) e la realizzazione del primo giunto prototipo ABJ\_001 (presentato alla fiera Innotrans 2022), lo sviluppo del giunto è proseguito grazie al supporto di OVERAIL SpA (parte del gruppo SALCEF) che lo ha ufficialmente presentato al suo stand durante la fiera Innotrans 2024 (**Figura 4**). Il giunto ABJ è coperto da brevetto ed è stato raggiunto un accordo tra AB Consulting (titolare del brevetto) e OVERAIL per il suo sfruttamento commerciale nel mondo. Ulteriori informazioni sono presenti sul sito [www.absolutelybetterjoint.com](http://www.absolutelybetterjoint.com).



Figura 4. Attuale configurazione del nuovo giunto ABJ in esposizione allo stand SALCEF alla fiera INNOTRANS 2024

## 2. Descrizione del giunto ABJ

Nella sua attuale configurazione il giunto ABJ viene assemblato a partire da barre per ago 60E1A1 approvvigionate da fornitori qualificati. Le barre per ago hanno “forgiatura lunga” che ripristina la sezione della rotaia 60E1. La barra per ago ha uno spessore dell’anima pari a 44 mm e viene lavorata per fresatura CNC con un angolo di circa 3° per una lunghezza di circa 600 mm. La barra per ago durante e dopo la lavorazione è mostrata in **Figura 5**. Dopo l’accoppiamento delle due barre fresate si ottiene uno spessore dell’anima di ben 56 mm, di molto superiore ai già citati 16.5 mm della rotaia 60E1.

Sei fori di diametro 28 mm (il GII convenzionale ha fori di 32 mm) vengono realizzati nelle barre lavorate per l’inserimento di altrettanti chiodi a bloccaggio irreversibile tipo *Huck* da 1” (25.4 mm), isolati con canotti e rondelle in vetroresina. Le due barre lavorate possono essere così accoppiate con interposta una opportuna sagoma isolante in vetroresina “ad S” (di spessore 4 mm) e senza l’utilizzo delle ganasce laterali, a tutto vantaggio dell’ispezionabilità visiva durante le visite linea.



Figura 5. Fresatura della barra per ago (sinistra), barra per ago lavorata e sabbata in fase di montaggio (destra)

Le due barre lavorate ed accoppiate sono ulteriormente collegate da una piastra (con funzione di coprigiunto) di spessore 35 mm posta sotto al piede delle barre con l’obiettivo di compensare la differenza di altezza tra la barra per ago (134 mm) e la rotaia (172 mm), al contempo fornendo una eccezionale resistenza nei riguardi della trazione e, soprattutto, della flessione. Il collegamento tra le barre e il coprigiunto (con interposta una sagoma piana in vetroresina di 3 mm) è realizzato in utilizzando due ulteriori chiodi *Huck* ad asse verticale posizionati asimmetricamente (esistono infatti barre con forgiatura destra e con forgiatura sinistra). Il coprigiunto, un chiodo *Huck* e tutti gli elementi di isolamento sono mostrati in **Figura 6**.



Figura 6. Piastra coprigiunto universale, per barre con forgiatura destra o sinistra (sinistra), chiodo Huck completo di collare, rosette e canotto ed elementi in vetroresina per l'isolamento dei delle due barre lavorate (destra)

Tutte le superfici di accoppiamento sono incollate con una resina epossidica bicomponente strutturale ad alta resistenza (la stessa attualmente utilizzata per i GII convenzionali) e infine l'assemblaggio del giunto viene completato tramite il serraggio dei chiodi di bloccaggio tramite una specifica pistola idraulica (**Figura 7**). Una volta completato il montaggio il giunto deve stagionare per circa 15 giorni per permettere il completo indurimento del collante (fase di cura).



Figura 7. Serraggio dei chiodi Huck con pistola idraulica

### 3. Calcolo strutturale e validazione sperimentale del giunto ABJ

Mentre le sollecitazioni sugli elementi strutturali (barre per ago, coprigiunto e chiodi di bloccaggio) sotto l'azione dei carichi esterni possono essere calcolate con buona approssimazione, il comportamento del collante non è facilmente modellabile, in particolare se combinato all'azione di bloccaggio dei chiodi. Un esempio delle tensioni, calcolate tramite il metodo agli elementi finiti, su una delle due barre per ago del giunto sotto l'azione del carico di flessione pari a 300 kN è riportato in **Figura 8**.

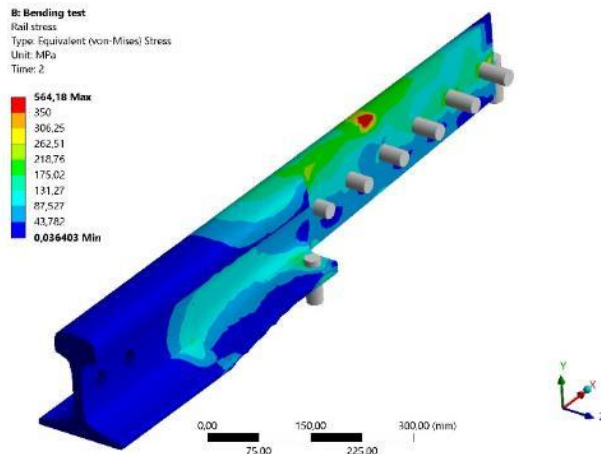


Figura 8. Tensioni di Von Mises su una delle due barre per ago che compongono il giunto sotto un carico di flessione pari a 300 kN

La progettazione di giunti ibridi, cioè incollati e bullonati, non è infatti completamente descritta dalla letteratura tecnica e scientifica, e per questo motivo spesso viene fatta l'ipotesi che la resistenza globale sia data dalla somma della resistenza "meccanica" dei chiodi di bloccaggio e della resistenza "chimica" del collante. Tale ipotesi può essere valida per giunti poco sollecitati mentre non trova alcun riscontro per giunti fortemente sollecitati come il giunto ABJ.

Ad esempio, considerando solamente la resistenza strutturale del collante epossidico bicomponente normalmente impiegato nei GII (descritto nella specifica [9] in cui viene specificata una resistenza a taglio  $\tau=24$  MPa) che interessa un'area  $A=95387$  mm<sup>2</sup>, si ottiene una resistenza pari a  $F=\tau A= 2290$  kN, di per sé sufficiente a garantire la resistenza alla trazione del giunto. Tale valore è però, puramente teorico in quanto la resistenza del collante è calcolata come valore medio sull'area d'incollaggio senza considerare gli effetti di bordo in cui influiscono in maniera importante anche le tensioni di *peel* che tendono a separare i due aderenti.

L'importanza del contributo dei chiodi di bloccaggio è quindi confermata sia dai calcoli agli elementi finiti che dalle prime prove sui prototipi. Il calcolo ha dimostrato che le tensioni di taglio e di *peel* negli elementi di contatto raggiungono valori non compatibili con la resistenza del collante senza considerare il precarico di almeno quattro chiodi. L'incertezza intrinseca di un modello non verificato ha però richiesto una maggiore cautela progettuale ed i primi prototipi sono stati assemblati con sei chiodi trasversali tra le barre per ago ed ulteriori morsetti di bloccaggio ("*traversini*") che tramite quattordici viti M12 andavano a rafforzare ulteriormente il collegamento tra le barre per ago e il coprigiunto inferiore.

Dopo il primo prototipo ABJ\_001, il cui scopo era solamente quello di verificare la fattibilità del progetto, una prima preserie (ABJ\_002...006) è stata utilizzata per testare la resistenza del giunto, che ha mostrato valori eccellenti, sopravvivendo a carichi di *pull-apart* (trazione) di ben 2000 kN!

Sono state quindi valutate alcune alternative per semplificare il giunto, semplificandone la struttura, le fasi di montaggio ed il numero di componenti. Dalle prove è emerso che la presenza dei traversini non risulta necessaria a soddisfare i requisiti meccanici sia con carichi assiali che flessionali. Quindi i traversini sono stati rimossi semplificando notevolmente la struttura del giunto.

Sono anche state condotte prove esplorative per verificare la resistenza del giunto utilizzando solo quattro chiodi trasversali anziché sei. Le prove hanno mostrato un notevole indebolimento del giunto che in due prove si è rotto a circa a 1300 kN (comunque non lontano dal valore minimo richiesto dalla nuova norma EN [8] per un  $\Delta T=50^\circ$  C, cioè 1450 kN). I risultati delle prove esplorative hanno quindi dimostrato che:

- i risultati sperimentali sono fondamentali in quanto le metodologie di calcolo agli elementi finiti considerando le classiche proprietà degli elementi di contatto non sono in grado di riprodurre il reale comportamento del giunto ABJ e sarebbero necessari criteri di modellazione più sofisticati per ottenere risultati numerici più accurati;
- la resistenza meccanica del giunto ABJ è superiore a quella alle richieste di qualunque normativa e permette anche di ipotizzarne un uso con successo nel settore *heavy haul*;
- il giunto ABJ è configurabile a seconda delle varie esigenze (in casi in cui non siano previsti importanti carichi termici, come nelle metropolitane, è possibile realizzare anche versioni semplificate a quattro chiodi);

In **Figura 9** si riporta il confronto tra due prove di trazione e il calcolo agli elementi finiti in cui gli elementi di contatto sono modellati in modo non lineare con la tecnica *Cohesive Zone Material*.

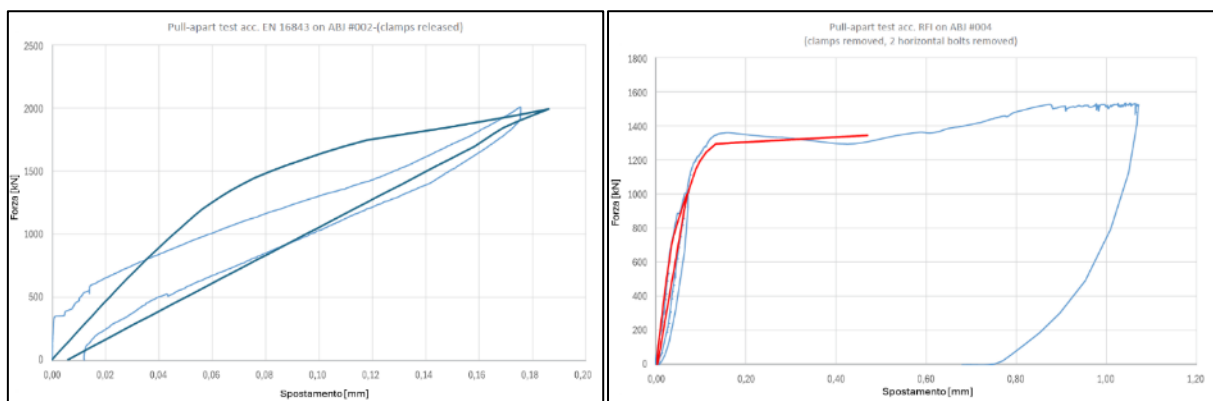


Figura 9. Confronto tra modello agli elementi finiti e prove di trazione effettuate in laboratorio sui giunti ABJ (a sinistra con sei chiodi senza traversini, a destra con solo quattro chiodi).

#### 4. Prove di qualifica

Successivamente alle prove esplorative è stata realizzata un'ulteriore preserie (ABJ\_007...009) in cui sono state applicate le modifiche derivanti dalle indicazioni dei test effettuati sui primi cinque prototipi:

- rimozione dei traversini;
- modifica di alcuni elementi isolanti per garantire il soddisfacimento dei requisiti elettrici.

Sono state effettuate quindi nuove prove presso i laboratori dell'Università Tecnica di Monaco (TUM) *in primis* per la qualifica in accordo alla nuova norma Europea sui giunti isolanti incollati [8] e quindi alle specifiche tecniche di fornitura di alcuni gestori dell'infrastruttura (RFI [7], TCDD [9] e ÖBB [10]). In **Figura 10** è mostrata la configurazione per la prova di trazione, mentre in **Figura 11** per quella di flessione. I risultati delle prove hanno dimostrato che il giunto ABJ è in grado di soddisfare tutti i requisiti meccanici ed elettrici richiesti in termini di:

- **resistenza longitudinale:** il giunto è stato sottoposto a diverse condizioni di carico longitudinale raggiungendo una forza massima  $F=2000$  kN, in accordo alla normativa turca [9] ed austriaca [10], senza mostrare rotture o deformazioni permanenti. Si noti che tale forza longitudinale corrisponde ad una variazione termica rispetto alla temperatura neutra non riscontrabile nella realtà. Infatti,  $\Delta T = F/\alpha EA = 103^\circ\text{C}$  ( $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $E = 210 \times 10^9 \text{ MPa}$ ,  $A = 7670 \text{ mm}^2$  per la rotaia 60E1). Si noti che la norma europea [8] prevede l'utilizzo di un coefficiente di sicurezza  $\gamma_s$  almeno pari a 1.5, per cui il valore di  $\Delta T$  rispetto alla temperatura neutra (SFT, *Stress-Free Temperature*) risulterebbe pari a circa  $69^\circ\text{C}$ . Tali condizioni termiche risultano comunque al di fuori dalla pratica comune;
- **resistenza ai carichi affaticanti:** il giunto è stato sottoposto a un carico verticale alternato applicato al centro del giunto con gli appoggi posizionati a una distanza di 1100 mm (in modo da riprodurre la situazione anomala di una traversa mancante). Il massimo valore di momento flettente durante il ciclo di carico è stato pari a 71.25 kNm (carico max di 300 kN per  $2 \times 10^6$  cicli) in accordo a [7] che risulta essere la più severa in termini di carico massimo tra tutte quelle considerate. Anche in questo caso si tratta di condizioni di carico fuori dalla pratica comune;
- **resistenza elettrica:** la resistenza elettrica è risultata superiore al massimo misurabile dallo strumento utilizzato ( $>1200 \text{ M}\Omega$ ). Il requisito in [7],  $R > 600 \text{ M}\Omega$ , risulta quindi ampiamente soddisfatto.
- **isolamento elettrico:** il giunto è stato sottoposto a valori di tensione alternata (fino a 4000 VAC) per un minuto senza l'instaurazione di archi elettrici tra le parti del giunto isolate, quindi le richieste sulla rigidità dielettrica indicate in [7] sono soddisfatte.



Figura 10. Prova di trazione sul giunto ABJ-007. Due trasduttori di spostamento sono posizionati per la misura dell'allungamento residuo al termine della prova



Figura 11. Prova di flessione sul giunto ABJ-009. Un trasduttore di spostamento è posizionato per monitorare l'abbassamento verticale del giunto durante l'intero arco della prova

In **Tabella 1** si riporta una tabella di sintesi dei risultati ottenuti. Si noti che il giunto ABJ\_009 è stato soggetto ad un carico affaticante incrementale essendo stato sottoposto prima alla prova secondo EN per tre milioni di cicli e successivamente alla prova secondo ÖBB per altri cinque milioni di cicli, resistendo senza danneggiamenti strutturali per un totale di 8 milioni di cicli.

Tabella 1. Tabella di sintesi delle prove di qualifica effettuate al TUM. Anziché le forze verticali vengono indicati i momenti flettenti in mezzzeria del giunto.

	<b>Prove di trazione</b>		
	EN13684 [8]	RFI [7]	ÖBB -TCDD [9][10]
<b>ABJ_007</b>	Superata > 1450 kN	Superata > 1500 kN	Superata > 2000 kN
	<b>Prove di flessione con carico affaticante</b>		
<b>ABJ_008</b>	-	Superata con 71.25 kNm > 2 milioni di cicli	-
<b>ABJ_009</b>	Superata con 26.5 kNm > 3 milioni di cicli	-	Superata con 50 kNm > 5 milioni di cicli

In modo da individuare il limite ultimo della resistenza di un giunto e di valutare i modi guasto e l'albero dei guasti, il giunto ABJ\_009 è stato ulteriormente assoggettato al carico flessionale previsto dalla specifica RFI. L'analisi di queste prove investigative non viene riportata per brevità nella presente memoria e sarà oggetto di ulteriori pubblicazioni. Si può comunque riportare (come indicato nel relativo rapporto del TUM) come nonostante alcuni danneggiamenti il giunto sia riuscito a completare gli ulteriori 2 milioni di cicli senza perdere lo scollamento fra le barre e mantenendo quindi l'integrità richiesta per la sicurezza del passaggio dei convogli sullo stesso.



## 5. Considerazioni sui carichi dinamici

Le prove di qualsiasi tipo non possono in alcun caso riprodurre le reali condizioni in cui i GII si trovano a lavorare. Risulta infatti impossibile riprodurre in laboratorio i carichi dinamici dovuti alla discontinuità creata dalla presenza del giunto stesso e dai conseguenti urti che, oltre ad essere un'importante fonte di rumore e vibrazione, risultano essere la *root cause* dei principali modi di guasto dei GII.

Nei giunti convenzionali i carichi dinamici portano allo scollamento del giunto ed al conseguente allontanamento delle testate nella stagione fredda. In questa circostanza le chiavarde (chiodi *Huck*) vengono a contatto dei fori provocando la formazione e la propagazione di *cricche partenti dai fori* con angolo di 45° (piani di taglio massimo). Tale difetto, denominato *star crack* per la classica forma o *difetto 135* in accordo alla denominazione UIC, può portare al completo distacco di una parte della testa della rotaia con conseguenze catastrofiche. Questo difetto può essere intercettato solo mediante controlli non distruttivi ad ultrasuoni vista l'impossibilità di effettuare controlli visivi (il difetto è nascosto dalle ganasce) e, peraltro, con i limiti intrinseci del metodo UT quando utilizzati nell'ambito della cosiddetta *diagnostica mobile*.

Tale problematica è stata in parte mitigata da alcuni produttori utilizzando la cosiddetta tecnica del *cold bolt expansion* [11] con la quale viene instaurata una tensione residua di compressione sul foro tramite l'azione di un perno conico che viene tirato attraverso il foro stesso, in modo da rallentare la nucleazione delle cricche.

Per eliminare completamente il problema risulta però necessario eliminare i carichi dinamici e il giunto ABJ è stato progettato in questa ottica. Il lungo taglio inclinato permette una progressiva transizione della forza da una rotaia all'altra senza che siano presenti discontinuità, mentre il coprigiunto fornisce una maggiore rigidezza a flessione distribuendo in maniera più uniforme i carichi.

Per verificare il comportamento del giunto ABJ in queste condizioni, sono state effettuate simulazioni dinamiche agli elementi finiti con un carico per ruota di 100 kN ad una velocità di 100 km/h [12]. In **Figura 12** si riporta il risultato di una simulazione in cui è possibile osservare come la transizione della forza da una rotaia all'altra avvenga in maniera graduale su una lunghezza di circa 200 mm. Questo garantisce l'assenza di urti al passaggio del veicolo e di conseguenza *tutte le problematiche dei GII convenzionali sono evitate alla radice*.

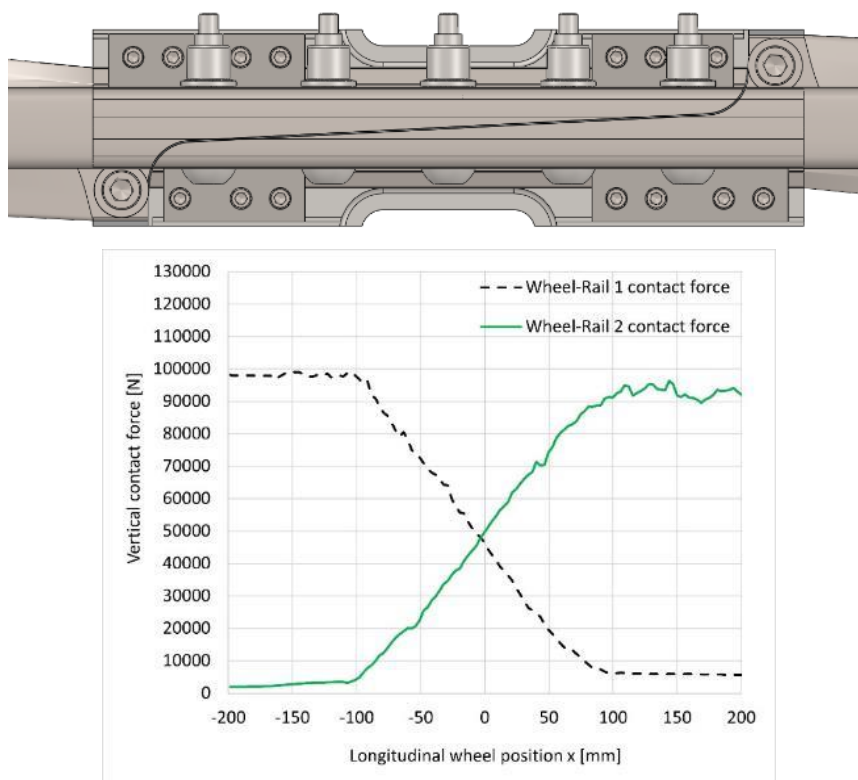


Figura 12. Risultati della simulazione agli elementi finiti per la verifica del comportamento dinamico del giunto [12]

## 6. Conclusioni e sviluppi

La memoria ha presentato un nuovo tipo di Giunto Isolante Incollato, denominato ABJ – *Absolutely Better Joint*, che elimina la *root cause* dei guasti dei GII convenzionali in quanto gli urti al passaggio delle ruote sono completamente eliminati grazie alla transizione graduale data dal taglio inclinato.

Le prove di laboratorio effettuate presso il TUM hanno fornito prima buone indicazioni per la semplificazione e l'ottimizzazione del giunto e successivamente hanno permesso di dimostrare il soddisfacimento di tutti i requisiti (elettrici e meccanici) previsti dalle norme internazionali e dalle più stringenti specifiche di alcuni gestori dell'infrastruttura.

Si può quindi concludere che il giunto ABJ rappresenti la soluzione definitiva a tutti i problemi legati al degrado ed ai guasti dei GII convenzionali.

Sono attualmente in corso contatti con diversi gestori infrastruttura (ADIF, DB, Network Rail, RFI, TCDD) per effettuare la sperimentazione in linea necessaria al completamento del ciclo omologativo. A tal fine la produzione di un ulteriore lotto di dieci giunti destinati alle prove in linea è prevista per inizio 2025.

### Riferimenti

- [1] OTIV, Automatic Train Operation (ATO): Driving the Future of Rail, <https://www.otiv.ai/blog/automatic-train-operation-ato-driving-the-future-of-rail> (visitato il 25.11.2025)
- [2] LB Foster, Rail products, <https://lbfooster.com/rail/rail-products>, (visitato il 25.11.2025)
- [3] EN13674-2:2019 - Railway applications - Track - Rail - Part 2: Switch and crossing rails used in conjunction with Vignole railway rails 46 kg/m and above
- [4] EN16273:2014 - Railway applications - Track - Forged rail transitions
- [5] Voestalpine, Insulated Rail Joints IVB 30 / IVG 30, <https://www.voestalpine.com/railway-systems/en/products/insulated-rail-joint-ivb-30-ivg-30/>, (visitato il 25.11.2025)
- [6] DB manual, Work procedures for permanent way maintenance, 7<sup>th</sup> revised and extended edition – Bahn Fachverlag GmbH, Berlin 2013.
- [7] RFI TCAR SF AR 07 008 A, Specifica tecnica di fornitura dei giunti isolanti incollati, 2016
- [8] EN 13684:2024, Railway applications - Infrastructure - Mechanical requirements for joints in running rails, CEN, Brussels
- [9] TCDD, Insulated Rail Joint (IRC) Technical Specification, 2017
- [10] ÖBB-Infrastruktur, Isolierstöße required tests for homologation, 2021
- [11] Hird Rail Development, RailTec Cold Bolt Hole Expansion (CBX) Kit, <https://www.hirdraildevelopment.com/products/bolt-hole-crack-prevention-cbx/>, (visitato il 25.11.2025)
- [12] Megna G., Bracciali A., Mandal N.K., Design, wheel-rail interaction and testing of an innovative reinforced smooth transition insulated rail joint, Wear, Volumes 530–531, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205038>