

Coordinato da



Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti

Organizzato da

ASSOCIAZIONE ITALIANA
per INGEGNERIA
del TRAFFICO
e dei TRASPORTI



Collegio
Ingegneri
Ferroviari
Italiani



Area Tematica – PROBLEMATICHE DI ESERCIZIO

MODERNI SVILUPPI NELLA MANUTENZIONE DELLE SALE FERROVIARIE

Andrea Bracciali, Gianluca Megna
Università degli Studi di Firenze – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Gennaro Caianiello, Giorgio Caianiello
Nuova Comafer s.r.l., Caivano (Na)
Tel. 055 2758746, cell. 347 2429240, email: andrea.bracciali@unifi.it

1. INTRODUZIONE

Tutti i veicoli tranviari, metropolitani e ferroviari dotati di ruote in acciaio hanno la necessità di sostituirle, ad intervalli più o meno lunghi, per le inevitabili usure al contatto con le rotaie.

La manutenzione delle sale montate riveste un'importanza particolare per un rotabile ferrotranviario in quanto ha impatti diretti non solo sulla sicurezza di esercizio ma anche sull'economia dell'esercizio stesso in maniera rilevante. Le ruote ferroviarie vengono, fin quando possibile, riprofilate con una macchina utensile particolare, detta "tornio in fossa", al fine di ristabilire il corretto accoppiamento con il binario.

Quando la riprofilatura non è ulteriormente possibile, la pratica manutentiva "moderna", relativamente quindi a veicoli equipaggiati con ruote "monoblocco", prevede *in primis* la sostituzione totale della sala montata usurata con una con quote corrette in una "officina di primo livello" (spesso coincidente con i depositi dei mezzi) ed il successivo invio ad una "officina di secondo livello" per la sostituzione integrale delle ruote.

Questo è completamente diverso dal caso dei veicoli stradali. Con un paragone di assai semplice comprensione, prendendo a riferimento un veicolo stradale a trazione posteriore, come tutti i veicoli

pesanti o alcune autovetture, è come se all'atto della foratura di una ruota si smontasse l'intero ponte per inviarlo in revisione anziché cambiare la gomma!

I più giovani non sanno che la ferrovia è nata con filosofie (e con costi) diversi da quelli odierni. Le ruote originariamente erano "cerchiate", avevano cioè dei "centri ruota" (fusi o laminati) e dei "cerchioni" che, in quanto elementi di usura, erano destinati ad essere sostituiti quando avessero raggiunto la fine della loro vita utile (come noto il meccanismo che provoca la maggiore usura dei cerchioni è la riprofilatura!!!). Come si illustrerà in questo articolo, i motivi che hanno portato all'abbandono delle ruote "cerchiate" sono molteplici, sia di tipo tecnico che di tipo normativo che, forse più importanti di tutti, di tipo economico.

Non è un mistero che la crisi globale abbia ridotto grandemente le risorse a disposizione dei gestori del trasporto pubblico locale. Oggi gli esercenti si trovano molto spesso a dover esercire flotte di veicoli "vecchi" in quanto le risorse per acquistare veicoli nuovi possono risultare assai scarse. In questo scenario, l'approvvigionamento di numeri piccoli (o piccolissimi) di ruote monoblocco può risultare critico.

Le ruote monoblocco sono prodotte con impianti complessi da un numero estremamente ridotto di fornitori per i quali il *business* dei ricambi alle piccolissime flotte delle aziende di trasporto pubblico locale non è assolutamente attraente. La vertiginosa espansione dei mercati cinese, sudafricano, russo, indiano, etc., rende assai più appetibile la creazione di nuovi stabilimenti o apposite *joint ventures* in quei paesi rispetto alla fornitura di, poniamo, 8 centri ruota per il tram di una piccola città.

La recente ripresa del mercato, che fa seguito ad anni di contrazione, ha peggiorato ulteriormente le cose, saturando i produttori di sale montate e portando in numerosi casi all'allungamento dei tempi di consegna delle ruote. Anche le cosiddette operazioni di "ripristino" delle sale montate sono spese esternalizzate, con indubbia riduzione dei costi interni ma con incremento dei costi di logistica e possibili allungamenti dei tempi di riconsegna.

Il presente articolo analizza criticamente le procedure di manutenzione delle sale montate con ruote cerchiate "tradizionali" e, grazie alla presenza nelle officine di manutenzione di macchinari ed utensili "moderni" (anche se in realtà, essendo disponibili da oltre 40 anni, anch'essi sono diventati "tradizionali"...), mostra come esista nuovamente un futuro per le ruote cerchiate, un futuro economicamente conveniente, semplice ed in sicurezza basato sui criteri della meccanica per la quale l'intercambiabilità è un requisito fondamentale ed imprescindibile.

Non solo, l'articolo mostrerà come sarà possibile, in futuro, avere la disponibilità rapida ed efficiente di centri ruota di nuova generazione più semplici, resistenti e soprattutto facilmente reperibili sul mercato, profondamente modificando la *supply chain* dei centri ruota che diventeranno fornibili da decine di aziende senza incorrere in rischi derivanti da monopoli o cartelli di produttori di ruote monoblocco forgiate e laminate.

L'articolo esporrà quanto sopra detto con un caso reale applicato ad un rotabile reale in condizioni di esercizio reali. Ovviamente il rotabile è stato utilizzato solo nell'ambito di una sperimentazione ma questa, nondimeno, ha dimostrato la completa fattibilità di quanto studiato, realizzato e testato, e quindi di quanto sopra affermato.

2. PERCHE' LE RUOTE CERCHiate SONO SCOMPARSE?

Una volta tutti i veicoli ferroviari avevano ruote cerchiate. Dato che la frenatura era esclusivamente a ceppi agenti sulla tavola di rotolamento, gli unici elementi d'usura erano, ovviamente, i ceppi ed i cerchioni. Ci sono locomotive a vapore e, successivamente, locomotive elettriche, che hanno viaggiato per oltre 50 anni senza sostituire i centri ruota ed in molti casi neanche gli assi, cambiando solo i cerchioni ed i ceppi. Si tenga presente che nelle locomotive a vapore la presenza dei biellismi esterni costringeva in pratica ad utilizzare "boccole interne" con cuscinetti a strisciamento, che potevano essere raggiunti solamente attraverso le razze dei centri ruota che erano fusi in acciaio.

Dovendo analizzare il perché dell'ascesa delle ruote monoblocco occorre citare in primis il più grave problema delle ruote cerchiato, ossia il rischio di scalettamento del cerchione. Questo rischio diventava certezza nel caso di frenature di ritenuta di veicoli merci sulle lunghe discese alpine, a grave detrimento della sicurezza. Dagli anni '60 del secolo scorso, quindi, si è compreso che per il traffico merci le ruote cerchiato erano inadeguate a garantire il livello di sicurezza desiderato ed hanno iniziato a svilupparsi le ruote monoblocco a basse tensioni residue, specifiche per la frenatura a ceppi.

La seconda ragione per il progressivo abbandono delle ruote cerchiato è da ricercare nella normativa europea. Nel 2002, infatti, sono state pubblicate le Specifiche Tecniche di Interoperabilità per il sistema ad Alta Velocità Europeo. Come noto, le STI sono "supportate" dalle norme EN che devono essere conformi ai requisiti essenziali delle STI stesse. Trattandosi di alta velocità, è ovvio che non si potessero utilizzare ruote cerchiato, per il semplice motivo che le azioni centrifughe a 300 km/h sono molto elevate e possono portare allo smontaggio del cerchione. Quando poi, nel 2007, sono state pubblicate le STI per la "ferrovia convenzionale", il normatore si è "dimenticato" di reinserire le ruote cerchiato. E' bene ricordare che la partecipazione ai gruppi di normazione è volontaria e non retribuita, e che tutti i produttori di ruote ferroviarie (ovviamente monoblocco) non avevano alcun interesse a reintrodurre una soluzione che li faceva guadagnare meno.

Ma la terza ed ultima ragione, che pure ha scalzato le ruote cerchiato dal mondo a loro congeniale (metro, light rail, trasporti regionali fino a 160 km/h), è stata la questione costi di manutenzione. Il ciclo di manutenzione di una sala con ruote monoblocco prevede lo scalettamento della stessa in caso di necessità di sostituzione, la "ripresa" della portata sull'asse se necessario, la foratura della ruota per ottenere un accoppiamento con il grado di interferenza richiesta ed il successivo calettamento, tipicamente a freddo (anche se alcune amministrazioni ferroviarie continuano a calettare le ruote a caldo). L'intero processo è molto veloce e richiede poche risorse umane, risultando imbattibile soprattutto al confronto del processo di sostituzione dei cerchioni, che verrà dettagliato nel successivo paragrafo.

3. LA MANUTENZIONE DELLE SALE CON LE RUOTE CERCHIATE

La manutenzione delle sale con ruote cerchiato ha beneficiato in misura trascurabile dal progresso tecnologico. Questo è ascrivibile ai seguenti motivi:

- nessun moderno veicolo è equipaggiato con ruote cerchiato, per cui i cicli di manutenzione, sottoposti agli organi competenti per l'approvazione, sono stati ottimizzati solo per le ruote monoblocco;
- non avendo sviluppi né futuro, e con le flotte sempre più ridotte e destinate a servizi locali o comunque secondari, i vari utilizzatori non hanno investito né in formazione del personale né in attrezzature / macchinari, rischiando in alcuni casi il paradosso di fermare i veicoli perché andava in pensione "il tornitore bravo";
- né gli enti normatori nazionali, sempre meno influenti, né tantomeno il normatore europeo hanno mai preso in considerazione le ruote cerchiato, venendo quindi a mancare un supporto normativo che a suo modo indirizza anche la manutenzione;
- le varie amministrazioni ferroviarie "storiche", ormai pressoché scomparse a seguito delle direttive comunitarie, hanno smesso di "legiferare" nel campo delle sale montate, per cui gli unici testi oggi ritrovabili sulla manutenzione delle sale montate sono "istruzioni tecniche" di oltre 20-30 anni mai più aggiornate (e d'altronde non avrebbe avuto senso).

Quale risultato, le officine che ancora fanno manutenzione alle ruote cerchiato sono caratterizzate da macchine manuali, elevata specializzazione del personale, strumenti di misura tipicamente manuali e produzione ridottissima. Spesso queste officine lavorano un mix di ruote assai diverse, rendendo impossibile una benché minima automazione del processo manutentivo. Spesso le sale arrivano in condizioni "disperate" risultanti da un esercizio pluridecennale che le allontana completamente dagli standard d'origine (figuriamoci da quelli moderni!). Si tratta, insomma, di lavorazioni che fanno somigliare l'officina più ad un atelier sartoriale che ad un processo industriale.

Gli autori hanno esaminato la pratica manutentiva di diversi esercenti che usano veicoli ferroviari, metropolitani e tranviari con ruote cerchiate, ed hanno pubblicato la memoria [1] che espone le diversità e, soprattutto, gli anacronismi della manutenzione delle sale cerchiate. Un esempio piuttosto lampante è quello della foto in Figura 1.

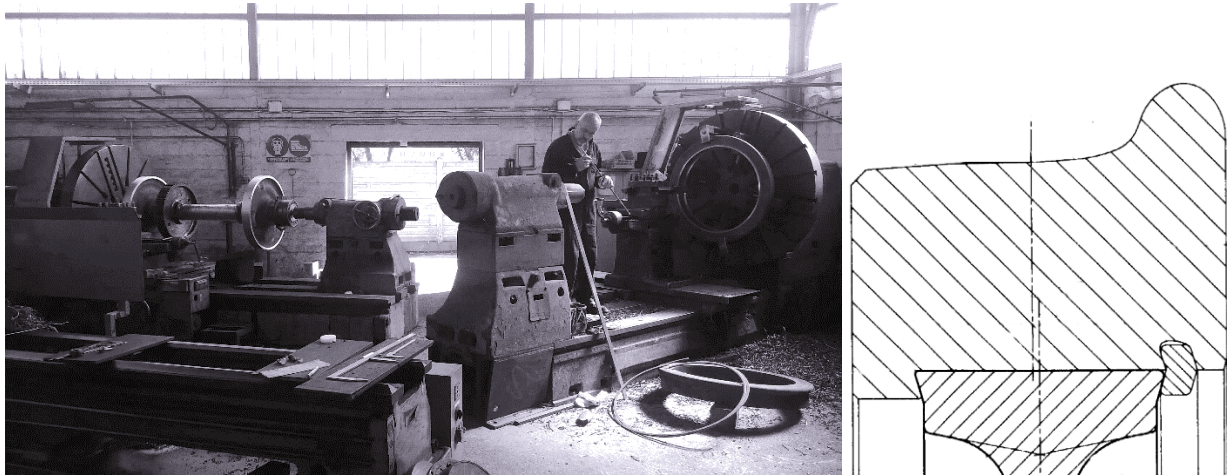


Figura 1. A sinistra: officina con macchine utensili tradizionali per lavorazioni completamente manuali su sale cerchiate (foto dell'autore). A destra: sezione di una ruota cerchiata con centro ruota, cerchione e cerchietto di sicurezza.

In pratica, nella maggior parte dei casi, la manutenzione di una sala montata con ruote cerchiate prevede i seguenti passi:

1. la sala montata viene portata su un "tornio sale" dove i cerchietti vengono torniti e quindi rimossi;
2. la sala viene portata alla stazione di taglio cerchioni, tipicamente con sega alternativa;
3. la sala viene portata alla stazione di rimozione dei cerchioni, dove i cerchioni pressoché completamente tagliati vengono rimossi con una pressa;
4. la sala viene portata sul tornio sale dove i centri ruota vengono torniti ad un diametro leggermente minore;
5. i cerchioni grezzi vengono portati ad un tornio (tipicamente verticale) e lavorati sul foro in modo da avere la corretta interferenza con il centro ruota;
6. i cerchioni parzialmente lavorati vengono portati ad una stazione di riscaldamento (tipicamente ad induzione o con forno elettrico);
7. i cerchioni caldi e la sala vengono portati alla zona di assemblaggio, dove vengono montati con una procedura manuale (asse verticale "a testa in giù");
8. la sala viene portata alla stazione di montaggio dei cerchietti di sicurezza;
9. infine la sala viene portata al tornio sale per la lavorazione finale dei cerchioni.

Sebbene questa procedura possa avere delle varianti (ad esempio i cerchioni si possono rimuovere per riscaldamento alla fiamma o ad induzione), si capisce facilmente come la sala montata venga "presa in mano" e movimentata così tante volte che l'intero procedimento è lunghissimo e, di conseguenza, costosissimo.

La rilavorazione delle superfici di accoppiamento è un controsenso nella meccanica, è come se prima di montare degli pneumatici nuovi si dovessero ritornire i cerchioni di un'automobile... ed ancora più inquietante è il quadro nel quale gli pneumatici appena sostituiti dovessero essere torniti prima di andare in strada!!!

4. LA PRIMA IPOTESI DI SOLUZIONE

4.1 Il concetto

Nell'intento di determinare una soluzione "moderna" ad un problema antico, la sostituzione dei cerchioni, si è anzitutto tentato di capire quale fosse la miglior sequenza da seguire. Dopo accurate analisi, si è pensato quanto segue:

- occorreva anzitutto eliminare il cerchietto di sicurezza senza ridurre le condizioni di sicurezza. Anche se questo può apparire un ossimoro, occorre ricordare che il cerchietto entra in funzione come *extrema ratio* quando il cerchione ha ormai perso aderenza sul centro ruota, il che per verificarsi richiede, obbligatoriamente, il riscaldamento del cerchione durante la frenatura. Quindi, il cerchietto si può rimuovere nei veicoli frenati a dischi ma va sostituito con qualcosa di diverso per garantire la sicurezza nei veicoli frenati a ceppi;
- qualsiasi accoppiamento esclusivamente per attrito è, intrinsecamente, inaffidabile, per cui si è iniziato a pensare ad un accoppiamento di forma;
- gli accoppiamenti di forma possono essere realizzati o con parti meccanicamente disgiunte collegate con elementi di collegamento (es.: ruote elastiche dei tram) o mediante "scavallamento" delle parti ottenuta per raffreddamento dell'albero e/o riscaldamento del mozzo che consentano di superare lo "scalino" (noto in meccanica come "battuta" o "spallamento") che si presenta inevitabilmente in ogni accoppiamento positivo;
- il ricorso a parti completamente lavorate, con tolleranze definite secondo la normativa ISO e non con formule più o meno empiriche, avrebbe portato alla non necessità di rimontare la sala sul tornio sale una volta completato il calettamento.

4.2 La soluzione individuata

La soluzione individuata inizialmente, e presentata in [1], era quella riportata in Figura 2, relativa ad un accoppiamento a coda di rondine simmetrica. Come si osserva, si è mantenuta anche l'interferenza richiesta dalle norme nazionali "storiche" tutt'ora in vigore, in quanto l'ottimizzazione degli spessori dei cerchioni e delle tensioni di calettamento, oggetto della memoria [2], non viene illustrata nella presente memoria.

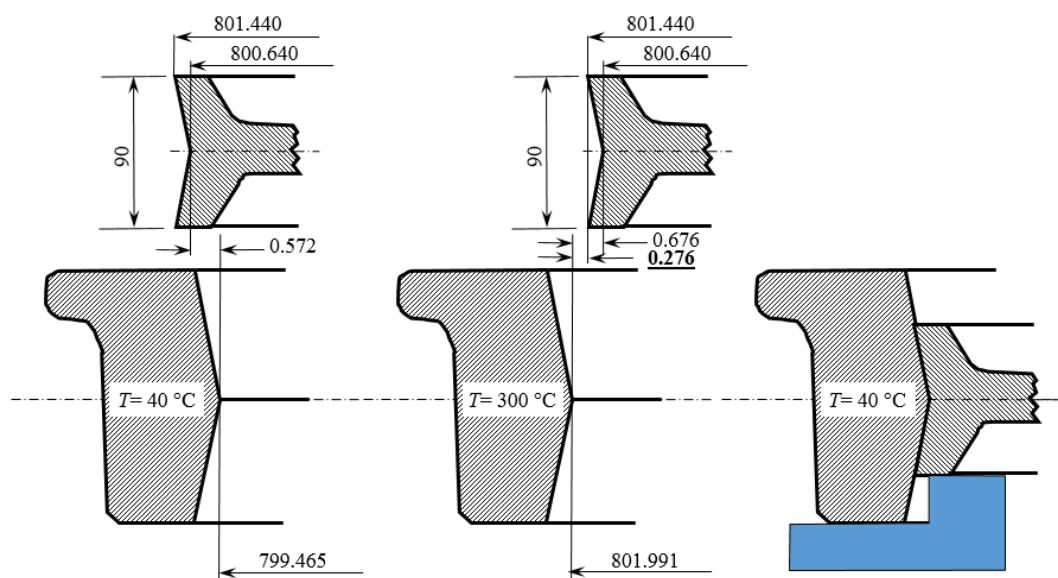


Figura 2. Posizione relativa di centro ruota e cerchioni coassiali con accoppiamento 800 t7/S8 a caldo (cerchione a 300 °C, al centro) ed a freddo dopo calettamento (a destra). Un gioco radiale sufficiente per il montaggio (0.276 mm) si ottiene anche con la massima interferenza radiale di 0.572 mm. Sulla destra: attrezzatura necessaria per garantire le tolleranze dimensionali dopo il montaggio.

Da un punto di vista della sicurezza occorre evidentemente valutare cosa può succedere all'atto dell'applicazione di una forza laterale (di bordino in curva o dal lato interno della ruota nel transito sui deviatori), e questo ha obbligato a considerare modelli particolarmente complessi che facessero

ricorso alla modellazione dei contatti; superando abbondantemente il campo elastico, per garantire una certa affidabilità nel dominio elastoplastico per consentire il movimento senza “compenetrazione dei solidi”, si sono dovute effettuare le usuali simulazioni nel calcolo strutturale in questo settore.

Questa soluzione, scelta per la sua simmetria e la sua eleganza, si è rivelata errata per diversi motivi:

- con la usuale conformazione dei centri ruota, una spinta laterale provoca una reazione radiale molto elevata (le conicità sono bassissime), il che può risultare in cedimenti elastici e plastici molto elevati della parte esterna dell'accoppiamento se la sezione del centro ruota è quella standard con una cartella più o meno centrata (Figura 3);
- ne consegue che la parte di accoppiamento potrebbe utilmente essere concentrata nella zona centrale;
- le spinte laterali verso l'interno (marcia in curva) sono assai più frequenti e maggiori di quelle verso l'esterno (marcia sui deviatoi), tant'è che anche la soluzione classica (cerchione con spallamento) ha previsto in numerosi mezzi (soprattutto all'estero) il ricorso a soluzioni senza bordino. Ne consegue che una buona soluzione potrebbe essere asimmetrica.

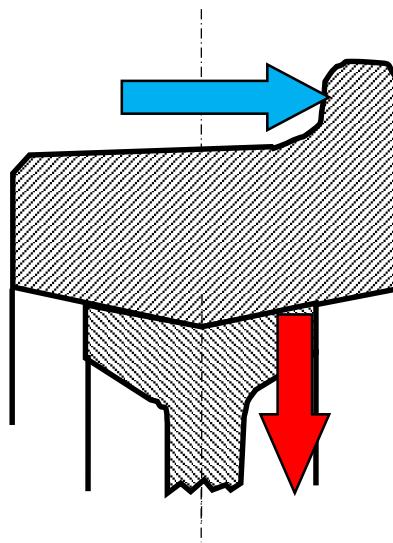


Figura 3. A sinistra: forza laterale applicata al bordino ed effetto sulle superfici a coda di rondine accoppiate.

4.3 La sperimentazione sulla ALn668.1036

I concetti sopra esposti sono stati messi in pratica utilizzando il veicolo ALn663.1036 di Trenord che viene mantenuto presso le officine sociali di Iseo (Bs). Sono state provate due distinte geometrie (Figura 4):

- un accoppiamento simmetrico, con superfici toroidali, di semplicissima realizzazione alla macchina utensile, su un carrello;
- un accoppiamento asimmetrico, con coda di rondine rovesciata rispetto a quanto visto precedentemente, sull'altro carrello.

Naturalmente l'approntamento delle sale ha richiesto alcune cautele d'officina, attuate presso l'officina Nuova Comafer, che è bene descrivere:

- anzitutto si è partiti da centri ruota nuovi (quelli vecchi spesso sono deformati o, in generale, non sempre affidabili geometricamente a priori);
- nell'assemblare i centri ruota sull'assile si è preliminarmente tenuto conto dello spostamento assiale del centro ruota derivante dal calettamento del cerchione, anch'esso stimato a calcolo FEM;
- i rilievi geometrici sono stati effettuati sotto una macchina di misura a coordinate (CMM) al fine di garantire che cerchioni completamente lavorati (finiti) potessero effettivamente essere montati su centri ruota completamente lavorati (finiti);
- al fine di verificare l'effettiva montabilità è stato costruito un apposito banco con gli spessori visibili in Figura 2.

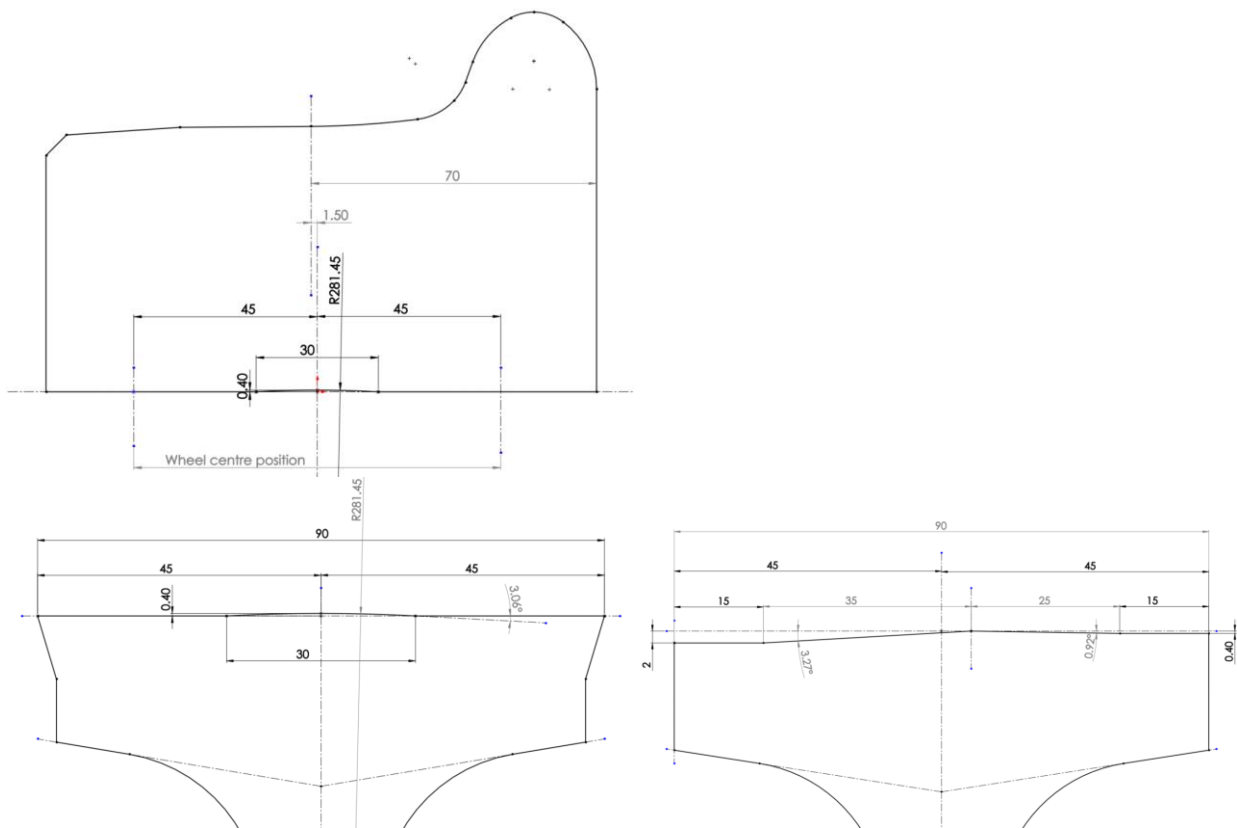


Figura 4. A sinistra: accoppiamento toroidale simmetrico. A destra: accoppiamento a coda di rondine asimmetrico.

I dettagli di questa attività sono riportati nel riferimento [3], articolo che verrà presentato al prossimo convegno International Wheelset Congress che si terrà a Venezia fra due settimane. Per completezza si riportano in Figura 5, Figura 6 e Figura 7 alcune foto delle lavorazioni meccaniche e delle prove effettuate ad Iseo il 21 novembre 2018, giorno che forse per la prima ed unica volta nella storia della ferrovia ha visto circolare un veicolo con le ruote cerchiato con cerchi privi di qualunque spallamento convenzionale e del cerchietto di sicurezza.



Figura 5. Montaggio di una sala portante sul cerchione a 300 °C sul banco appositamente costruito con l'interposizione di spessori calibrati (Nuova Comafer, Napoli, 11.10.2018)



Figura 6. La ALn668.1036 sul ponte girevole del deposito di Iseo, il 21 Novembre 2018.



Figura 7. Una bella immagine scattata lungo le rive del lago di Iseo durante una sosta per motivi di esercizio il 21 Novembre 2018.

Durante le prove in linea è stata misurata la temperatura dei ceppi e dei cerchioni, come illustrato in Figura 8. Per ulteriori dettagli il lettore è rinviato al già citato lavoro [3].

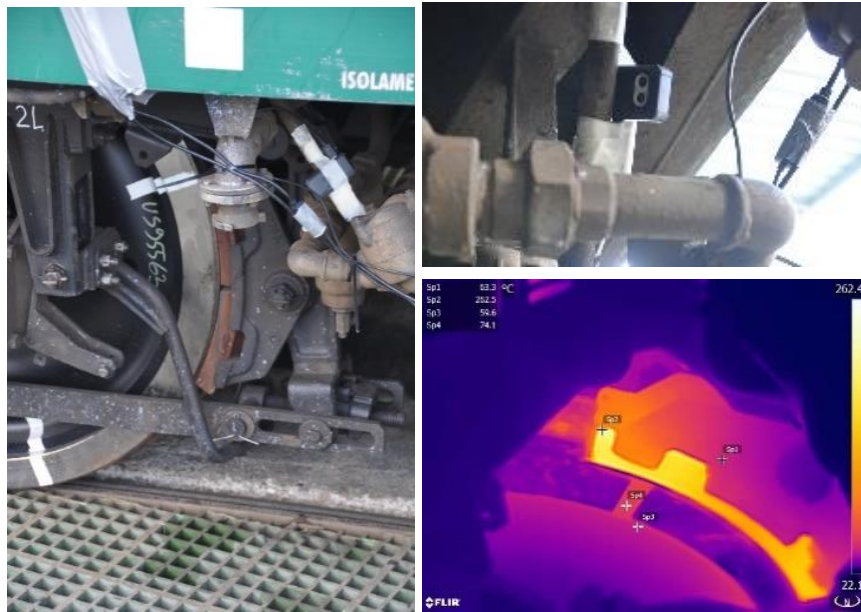


Figura 8. Temperature registrate di ceppo e cerchione della ALn668.1036 al termine di 7 frenate di emergenza consecutive il 21 Novembre 2018 nella tratta fra Breno e Darfo-Boario sulla linea Brescia-Edolo.

4.4 Conclusioni sulla sperimentazione sulla ALn668.1036

A valle della sperimentazione condotta sulla ALn668.1036 si può concludere che:

- è possibile lavorare preventivamente cerchioni e centri ruota ed ottenere un accoppiamento che rispetta geometricamente tutte le tolleranze normative richieste (es. dalla norma EN 13260);
- se il cerchione viene rimosso a caldo (induzione o fiamma), il centro ruota non va rilavorato e quindi la manutenzione si limita alla rimozione del vecchio cerchione ed al montaggio del nuovo senza alcuna altra operazione;
- pur essendo scomparso il cerchietto, la soluzione con accoppiamento positivo (di forma) garantisce la sicurezza contro lo smontaggio assiale, con forze superiori al cesoiamento del cerchietto di sicurezza;
- pur essendo stata pensata specificamente per rotabili con frenatura a dischi, la soluzione di può applicare anche con veicoli con frenatura a ceppi purché vengano mantenute le condizioni di interferenza del disegno di origine (sulle sale con frenatura a dischi saranno possibili ulteriori ottimizzazioni, come prima indicato).

5. LA SECONDA IPOTESI DI SOLUZIONE

5.1 Premessa

Nonostante la sperimentazione effettuata avesse fornito risultati lusinghieri, l'officina ha fornito preziosi suggerimenti per migliorare le lavorazioni ed il montaggio. E' risultato infatti che:

- accoppiamenti con forme "multiple" (spezzate, archi di cerchio), pur realizzabili, possono risultare in accoppiamenti non uniformi se le parti maschio e femmina non sono perfettamente uguali;
- la mancanza di uno spallamento fisico presente sul cerchione di fatto obbliga al montaggio in verticale, che se può andare bene in una fase sperimentale è certamente molto meno comodo in produzione od in officina, nella quale la sala può essere supportata in orizzontale sull'asse ed i cerchioni possono essere montati da ambo le parti con semplici attrezzature senza dover ricorrere al carro ponte.

5.2 La soluzione individuata

Si è quindi pensato ad una soluzione molto semplice, realizzata accoppiando profili conformi come segue:

- le superfici di accoppiamento sono diventate coniche, con conicità 1:75, facilmente realizzabili su un tornio a controllo numerico sia per il cerchione che, a maggior ragione, per il centro ruota;
- il cerchione è stato dotato di uno spallamento ridotto, utile per costituire una battuta meccanica in fase di montaggio e per impedire lo spostamento assiale del cerchione durante l'esercizio. La ridotta dimensione dello spallamento è funzionale a rendere meno asimmetriche le tensioni nel cerchione e nel centro ruota durante la vita della ruota (dopo le varie ritorniture). Si era infatti notata una indesiderabile crescita delle tensioni nel cerchione quando esso si approssimava al limite di usura.

La forma definitiva dell'accoppiamento è desumibile dal disegno del cerchione, riportato in Figura 9.

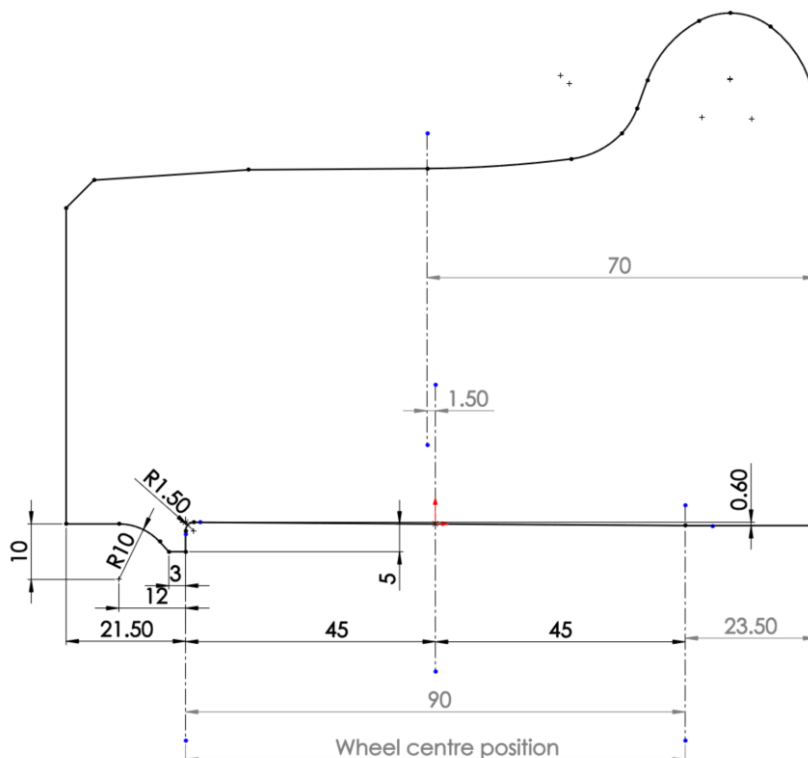


Figura 9. Geometria definitiva del cerchione, con una conicità di 1:75 ed uno spallamento di ridotte dimensioni.

5.3 La “Liberty Wheel” - un nuovo centro ruota (?)

Come più sopra detto, la parte conica dell'accoppiamento dovrebbe stare per quanto possibile in corrispondenza della vela (o cartella) che è la parte maggiormente rigida radialmente ed in grado di opporsi allo spostamento laterale del cerchione.

Purtroppo, i centri ruota sono tutti molto simili e sono caratterizzati da una certa ondulazione della vela (o cartella) che li rende sì elastici durante le fasi di calettamento ma anche altrettanto elastici durante un eventuale moto assiale del cerchione derivante da elevate spinte laterali.

Durante lo sviluppo della presente attività si è, però, verificata una importante coincidenza: la disponibilità di un nuovo centro ruota completamente diverso dai precedenti. Il centro ruota, infatti, è fuso in ghisa sferoidale austemperata ed ha due schiere di razze radiali. Per l'uso di un materiale molto diffuso in un certo periodo storico, per la forma “floreale” del centro ruota e per sottolineare le possibilità progettistiche rivoluzionarie dell'uso di questo materiale, il centro ruota è stato battezzato “Liberty Wheel”.

Non è possibile, in questa memoria, illustrare tutte le specificità del progetto di questo nuovo centro ruota, che sarà oggetto di due memorie al prossimo International Wheelset Congress ([4], [5]), una delle quali ha visto coinvolti:

- la Zanardi Fonderie di Minerbe (Vr), leader in Italia nella produzione e nella promozione dell'uso delle ghise austemperate;
- la Fonderia Silvano Baraldi di Montagnana (Pd), che ha prodotto modelli, anime e getti;
- l'officina Nuova Comafer di Caivano (Na), che ha effettuato le lavorazioni meccaniche ed i montaggi;
- l'impresa ferroviaria Trenord, che ha messo a disposizione mezzi e personale;
- il gestore dell'infrastruttura ferroviaria nazionale, RFI, che ha messo a disposizione il banco di prova a fatica ruote presso i laboratori di Osmannoro;
- la società Italcertifer che ha messo a disposizione tecnici e strumenti per le prove estensimetriche su una ruota prototipo;
- l'Università di Firenze, che ha disegnato e calcolato il nuovo centro ruota;
- la AB Consulting di Firenze, che ha ideato e coordinato l'intero progetto.

I vantaggi di un centro ruota in ghisa austemperata sono i seguenti:

- maggiore leggerezza, derivante dalla ottima colabilità della ghisa, con possibilità di ottenere forme pressoché arbitrarie con getti virtualmente esenti da difetti;
- caratteristiche meccaniche paragonabili agli acciai legati, con allungamenti a rottura e tenacità particolarmente interessanti;
- comportamento a fatica intrinsecamente sicuro, dato che le razze sono sempre soggette a carichi di compressione, indotti dal calettamento del cerchione, per cui risulta impossibile la propagazione di eventuali cricche di fatica;
- *supply chain* molto più ampia e versatile, con un rapporto probabilmente superiore a 10:1 fra tradizionali fornitori di centri ruota forgiati e laminati e fonderie di ghisa sferoidale.

In Figura 10, Figura 11 e Figura 12 vengono mostrate alcune fasi di produzione, lavorazione e controllo della Liberty Wheel. In Figura 13 viene mostrata la prima sala con Liberty Wheels assemblata. In Figura 14 vengono mostrate alcune fasi relative al centro ruota utilizzato per le prove di fatica attualmente in corso, strumentato da Italcertifer e montato sulla macchina di prova a fatica ruote di RFI presso i laboratori di Firenze Osmannoro (si veda anche più sotto).



Figura 10. Produzione delle prime tre Liberty Wheels (Fonderia Silvano Baraldi, Montagnana (Pd), 31.01.2019). In primo piano la prima Liberty Wheel, tagliata per le prove distruttive. Sono stati condotti esami non distruttivi con raggi X su una ruota e con ultrasuoni sul 100% dei pezzi prodotti, tutti risultati conformi.



Figura 11. A sinistra: getti da smaterozzare delle prime tre Liberty Wheels (Fonderia Silvano Baraldi, Montagnana (Pd), 31.01.2019). Al centro e a destra: calettamento del primo centro ruota e controllo dimensionale sotto CMM (Nuova Comafer, Caivano (Na), 14.03.2019)

5.4 La sperimentazione sulla ALn668.1053

Non appena sono stati disponibili i centri ruota prodotto dal secondo lotto (ulteriori 9 per un totale di 12 centri ruota), questi sono state lavorati e montati presso l'officina Nuova Comafer.



Figura 12. A sinistra: montaggio in verticale del primo centro ruota Liberty Wheel su una sala portante ALn668. A destra: durante il raffreddamento del cerchione. In questo caso lo spallamento sul cerchione ha reso inutili gli spessori calibrati precedentemente utilizzati. Ben in evidenza le due schiere di razze parallele che rendono unica la Liberty Wheel (Nuova Comafer, Caivano (Na), 16.04.2019).



Figura 13. Due viste della prima sala con ruote Liberty Wheels assemblate (Nuova Comafer – Caivano (Na) – 16.04.2019).

Le sale con Liberty Wheels sono quindi state inviate alle officine Trenord di Iseo e montate su un carrello. Le sale di un altro carrello, tradizionali, sono state tornite contemporaneamente in modo da avere la stessa rugosità superficiale. I due carrelli, preparati dalle officine Trenord di Iseo, sono stati montati il 14.05.2019 sotto la ALn668.1053, giorno del “battesimo ufficiale” sotto un rotabile della soluzione Liberty Wheel.



Figura 14. Calettamento della Liberty Wheel strumentata da Italcertifer per il rilievo delle tensioni residue dopo il calettamento e particolare della ruota con gli estensimetri applicati (Nuova Comafer, Caivano (Na), 10.05.2019).



Figura 15. Carrello della ALn668.1053 con Liberty Wheels pronto per il montaggio (officine Trenord, Iseo (Bs), 14.05.2019). Si noti che un asse è motore ed uno è portante (la Liberty Wheel è progettata per resistere ai massimi carichi torsionali).



Figura 16. Fotogramma di un filmato ripreso durante il primo movimento della ALn668.1053 con un carrello con Liberty Wheels (officine Trenord, Iseo (Bs), 14.05.2019).

Nei giorni successivi (15 e 16 maggio 2019) si sono svolte estensive prove in linea nella tratta FNM Bornato-Calino / Rovato Borgo, tratta fuori esercizio commerciale utilizzata esclusivamente per l'inoltro dei rotabili Trenord essendo la rete FNM interconnessa con la rete RFI presso la stazione di Rovato.

In corrispondenza del PL situato al km 2+956 (località Cazzago San Martino) sono state effettuate misure di rumore. In sintesi, l'intera indagine vibroacustica, completata da misure in laboratorio e presso le officine Trenord di Iseo, è consistita in:

- misure di rumore al *pass-by* in ottemperanza alla norma Europea EN ISO 3095 (Figura 19);
- misure di rugosità delle rotaie in ottemperanza alla norma Europea EN 15610 (Figura 18);
- misure di *track decay* delle rotaie in ottemperanza alla norma Europea EN ISO 15461 (Figura 18);
- misure di rugosità delle ruote in ottemperanza al progetto di norma Europea prEN15610 (Figura 20);
- misure di smorzamento del materiale su una ruota completa (in laboratorio) (Figura 17);
- misura della potenza sonora emessa dalla ruota in condizioni standard in accordo alla norma internazionale ISO 3744.

I risultati di questa attività altamente specialistica non possono certamente essere descritti nella presente memoria. Il lettore è rinviato al riferimento [6] per ulteriori dettagli, una volta che l'elaborazione dei dati sarà completata e la memoria verrà presentata.

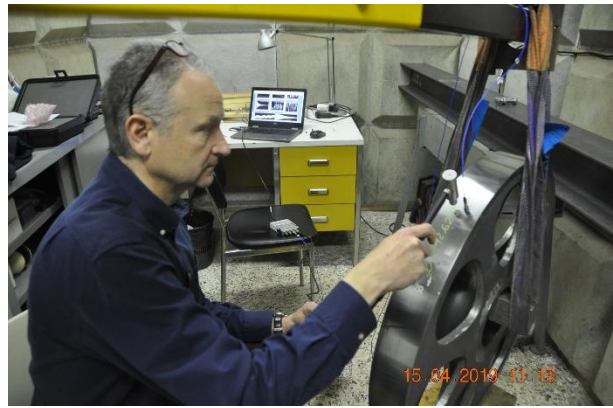


Figura 17. Misure di mobilità meccanica per validare il modello FEM della Liberty Wheel e determinare il coefficiente di smorzamento dei modi propri fino a 5 kHz. A sinistra: centro ruota standard ALn668. A destra: centro ruota Liberty Wheel per ALn668 (laboratori UNIFI, 15.04.2019).



Figura 18. PL km 2+956 della linea Bornato-Calino / Rovato (16.05.2019). Test di decadimento delle vibrazioni nel binario (track decay rate) e misura della rugosità delle rotaie (a destra). Entrambe le misure sono richieste dalla EN ISO 3095 (rispettivamente dalle norme EN 15641 ed EN 15610).



Figura 19. PL km 2+956 della linea Bornato-Calino / Rovato (16.05.2019). A sinistra: posizionamento dei microfoni a fini investigativi (2.1 m dall'asse del binario, altezza 460 mm dal p.d.f. pari all'altezza dell'asse delle sale) e normativi (7.5 m dall'asse del binario ed 1.2 m dal p.d.f.) secondo EN ISO 3095. A destra: pass-by della ALn668.1053 ad 80 km/h (velocità prescritta dalla norma).



Figura 20. Officine Trenord di Iseo (16.05.2019). Misura della rugosità delle ruote con strumento autocostruito (utilizzato anche per l'ETR1000) secondo prEN 15610. Le misure sono state effettuate al termine della campagna prove per ottenere superfici omogenee (eliminazione segni di tornitura anche mediante leggera frenatura costante durante le varie tratte).

Attualmente sono in corso prove di fatica *full scale* presso i laboratori di RFI SpA di Firenze Osmannoro per determinare le caratteristiche a fatica della prima ruota prodotta. Le prove verranno condotte con il metodo di Locati che, sotto determinate ipotesi, consente di determinare il limite di fatica mediante prove accelerate (Figura 21).



Figura 21. Montaggio della Liberty Wheel strumentata sul banco di prova a fatica di RFI presso il Centro di Dinamica Sperimentale di Firenze Osmannoro (foto RFI, 16.05.2019).

6. CONCLUSIONI ED ULTERIORI SVILUPPI

Nel presente lavoro si è dimostrato che le ruote cerchiata possono tornare nuovamente competitive in un mercato sempre più povero di risorse e con tempistiche sempre più ristrette.

Le modalità di lavorazione, assemblaggio e controllo delle ruote cerchiata proposte nella presente memoria sono già a disposizione delle officine meccaniche e delle officine di manutenzione ferroviaria, soprattutto di quelle di primo livello che potrebbero sostituirsi i cerchi da sole.

Rispetto a soluzioni più avveniristiche, quali le ruote monoblocco in ghisa ADI presentate allo scorso Innotrans (Berlino 2018), le ruote cerchiata usano assili in materiali noti e, soprattutto, cerchi in materiali noti, quest'ultimo fatto fondamentale perché le ruote sono un costituente di interoperabilità venendo a contatto con le rotaie.

Accoppiando le moderne tecniche di lavorazione con centri ruota in materiali innovativi, poco costosi, affidabili, resistenti e facilmente reperibili si potrebbe (finalmente!) "resuscitare" la ruota cerchiata che, andata prematuramente in pensione per questioni di costo e di altro genere, potrebbe ancora dare tante soddisfazioni in virtù della sua semplicità ed affidabilità quando correttamente progettata, costruita e mantenuta.

Si può quindi concludere che:

- con l'accoppiamento conico cerchio / centro ruota le officine potrebbero agevolmente sostituirsi i cerchi "in house", in tempi ristretti e con notevoli economie. Vengono quindi confermate tutte le prospettive di "autarchia" che erano alla base del progetto originario, essendo sufficiente approvvigionarsi di cerchi finiti ed un riscaldatore ad induzione dal costo assai limitato;
- il nuovo centro ruota, denominato *Liberty Wheel*, ha superato tutti gli *stage* di progettazione, lavorazione ed assemblaggio, mentre in corso sono le prove di fatica dalle quali si confida di ottenere risultati lusinghieri visti gli amplissimi margini di sicurezza utilizzati;
- di grande interesse sarebbe continuare la sperimentazione sul lungo periodo, ipotesi non così peregrina visto che il materiale rotabile utilizzato nel presente lavoro (ALn668) verrà pressoché totalmente dismesso nei prossimi 5-10 anni ed un veicolo potrebbe essere agevolmente utilizzato per effettuare test su lunga scala;
- le tecniche di progettazione, costruzione, lavorazione, assemblaggio e controllo rendono possibile ripetere l'intero ciclo per altri rotabili con relativa facilità, quindi è possibile realizzare centri ruota per altri rotabili senza particolari impedimenti;
- la *supply chain* viene completamente stravolta, dato che nella sola Italia del Nord, da una brevissima indagine di mercato, sono presenti oltre una decina di fonderie in grado di produrre i centri ruota con le caratteristiche richieste.

7. RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro non sarebbe stato possibile senza l'apporto fondamentale della Fonderia Silvano Baraldi, delle Fonderie Zanardi, di Italcertifer, di RFI e, soprattutto, di Trenord, che ha finanziato la costruzione delle 12 ruote prototipo, unica prestazione effettuata a titolo oneroso.

Gli autori intendono qui cumulativamente ringraziare i colleghi delle varie società che hanno investito, a titolo assolutamente gratuito, il loro tempo e le loro risorse per far sì che la *Liberty Wheel* potesse vedere la luce e correre sui binari nella speranza di un radioso futuro.

8. RIFERIMENTI

- [1] A. Bracciali, G. Megna: "Re-design of tyred wheels to optimize maintenance", Proceedings of The Fourth International Conference on Railway Technolgy, Railways 2018, 3-7 September 2018, Sitges, Barcelona, Spain. Disponibile su <http://www.andreabracciali.it/papers.htm> (articolo n° 120).
- [2] A. Bracciali, G. Megna: "Tyred wheels without braking: structural optimization", Proceedings of The Fourth International Conference on Railway Technolgy, Railways 2018, 3-7 September 2018, Sitges, Barcelona, Spain. Disponibile su <http://www.andreabracciali.it/papers.htm> (articolo n° 119).
- [3] A. Bracciali, G. Caianiello, G. Megna, P. Petreschi, L. Rota: "Dovetail Tyred Wheels – Application to a DMU", to be published in the Proceedings of the XIX International Wheelset Congress, Venice, Italy, June 16-20, 2019.
- [4] A. Bracciali, S. Masaggia, G. Megna, E. Veneri: "Quiet and light spoked wheel centres made of Austempered Ductile Iron", to be published in the Proceedings of the XIX International Wheelset Congress, Venice, Italy, June 16-20, 2019.
- [5] L. Bocciolini, R. Bovì, A. Bracciali, G. Caianiello, G. Megna, L. Rota, E. Temporin, E. Veneri: "Manufacturing and testing of a tyred wheel with casted ADI wheel centre", to be published in the Proceedings of the XIX International Wheelset Congress, Venice, Italy, June 16-20, 2019.
- [6] A. Bracciali, G. Megna: "Rolling noise emitted by tyred wheels with cast iron spoked wheel centre", to be published in Proceedings of 23rd International Congress on Acoustics, ICA 2019, Aachen, Germany, Sept. 09-13, 2019