

Ruote e binari



PARTE 1: L'ACCOPIAMENTO CERCHIONE-CENTRO RUOTA IL RITORNO DELLE RUOTE CERCHIATE?*

di **Andrea Bracciali,**
Gianluca Megna

Il passato

Anche se sembra assurdo a noi vecchi, i giovani non conoscono uno degli elementi che è stato, fino a 30 o 40 anni fa, uno degli elementi cardine della ferrovia: la ruota cerchiata. Mentre nei veicoli stradali ci sono cerchioni in acciaio stampato o fusi in lega leggera e pneumatici in gomma, in ferrovia si sono usati cerchioni in acciaio e “centri ruota” in acciaio fuso o forgiato e laminato per oltre 150 anni. I cerchioni, in quanto elementi di usura, erano destinati ad essere sostituiti quando avessero raggiunto la fine della loro vita, in modo analogo a quanto si fa con gli autoveicoli quando gli pneumatici sono usurati. Come si vedrà dopo, un elemento fondamentale (e parecchio fastidioso) delle ruote ferroviarie convenzionali è il cosiddetto “cerchietto di sicurezza”. Diversamente dai veicoli stradali, i cerchioni ferroviari hanno una parte, che entra in contatto con l’infrastruttura (binario), che

deve avere una geometria precisa, il che impone, al raggiungimento di certi limiti di usura, la cosiddetta “riprofilatura” (che altro non è che una tornitura per ristabilire il profilo) della “tavola di rotolamento” mediante una particolare macchina utensile, detta “tornio in fossa”, che consente di fare questa operazione con asportazione di truciolo senza smontare alcuna parte del veicolo.

Le ruote vengono montate (calettate a caldo o a freddo) su un asse (detto assile) formando quindi la cosiddetta “sala montata”. È evidente che la manutenzione delle sale montate rivesta un’importanza particolare per un veicolo ferroviario, metropolitano o tranviario in quanto essa 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 al fine di ristabilire il corretto accoppiamento con il binario.

* Il presente lavoro è basato sull’articolo A. Bracciali, G. Caianiello, G. Caianiello, G. Megna: *Moderni sviluppi nella manutenzione delle sale ferroviarie*, presentato all’8° Convegno Nazionale Sistema Tram, Roma 29/30 maggio 2019.

Il presente

Nel corso del XX secolo hanno preso sempre più piede sale montate con ruote diverse da quelle sopra descritte, ossia con ruote in un sol pezzo (per questo dette “monoblocco”), che hanno molto efficacemente sostituito le ruote precedenti alle quali è stato quindi assegnato il nome di “ruote in tre pezzi” (centro ruota + cerchione + cerchietto) o “ruote cerchiata” (Figura 1).

Le ruote cerchiata avevano infatti diversi grossi svantaggi:

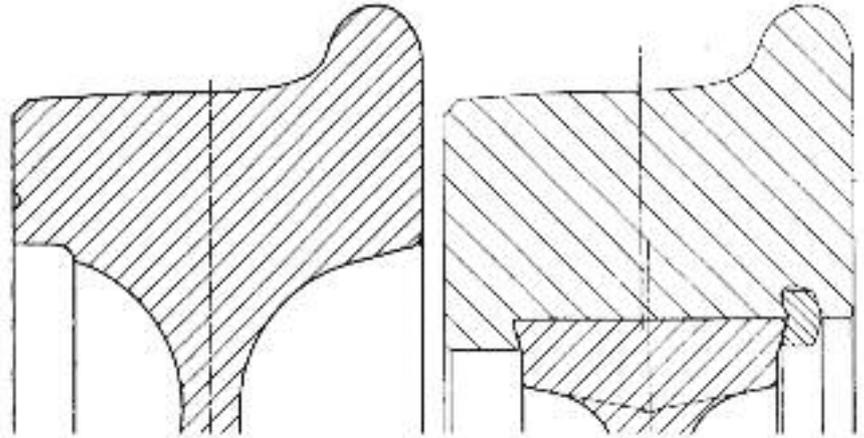
- durante la frenatura con ceppi, quella usata sin dall’inizio della ferrovia, i cerchioni si scaldano e tendono a smontarsi (“scalettarsi”) dal centro ruota, con gravi ripercussioni sulla sicurezza, e questo specialmente nei veicoli merci più pesanti durante le lunghe “frenate di ritenuta” discendendo i passi alpini;
- nel caso dei veicoli ad alta velocità, che si sono sempre più diffusi negli ultimi decenni, le sollecitazioni centrifughe sono deleterie per l’accoppiamento cerchione-centro ruota;
- la manutenzione delle ruote cerchiata è sempre stata molto onerosa in termini di tempo e quindi lo è diventata, visto anche il costo attuale del lavoro, anche in termini economici.

Le ruote monoblocco non hanno nessuno di questi svantaggi: possono essere progettate e costruite “termostabili”, quindi in grado di resistere a cicli di frenatura estremamente gravosi senza conseguenze strutturali, leggere e senza controindicazioni per le più alte velocità ed infine con un ciclo manutentivo molto semplice, che consiste nello “sfilare” dall’assile la ruota usurata mediante l’ausilio di un “estrattore” con olio ad alta pressione e sostituirla con una nuova.

Detta così, sembra che le ruote monoblocco siano la panacea, ed in effetti hanno completamente soppiantato le ruote cerchiata. Il lettore potrebbe allora domandarsi il perché di questa memoria, che in effetti non avrebbe senso se anche le ruote monoblocco non avessero i loro svantaggi, che qui di seguito elenchiamo:

- quando il cerchione non è più lavorabile, e dopo tutti i possibili cicli di riprofilatura, si sostituisce l’intera ruota anche se ne è “guastata” solo una minima parte. Come recita il detto popolare, “si getta il bambino con l’acqua sporca”, mandando a rottame diverse centinaia di kg di acciaio;

Figura 1 - Sezione di una ruota monoblocco (a sinistra, massa 340 kg) e della stessa ruota cerchiata (a destra, massa 420 kg) con diametro a nuovo 940 mm. Nella ruota cerchiata si evidenziano facilmente il centro ruota, il cerchione ed il cerchietto di sicurezza



- ancora più inquietante è che, in ottemperanza alle norme internazionali, le ruote monoblocco debbano essere costruite per durare per sempre (“a vita infinita”)... mentre poi si butta via tutto quando la sola parte periferica si è consumata!;
- come si vedrà qui sotto, le operazioni di smontaggio della ruota monoblocco consumata ed il montaggio di una ruota nuova, specialmente se a freddo, richiedono macchinari che non sono reperibili nelle officine di manutenzione corrente e pertanto obbligano all’invio della sala da “ripristinare” verso centri riparatori specializzati, con le conseguenze immaginabili sulla logistica;
- durante le fasi di smontaggio delle ruote monoblocco usurato ed il successivo montaggio a



ruote e binari



freddo delle ruote monoblocco nuove è molto probabile che si creino dei danneggiamenti (grippaggi) sulle zone dell'assile (dette "portate di calettamento") sui cui si montano le ruote monoblocco, con il risultato che anche l'assile va ritornito e, ad un certo punto, alienato anche se anch'esso è dimensionato a vita infinita.

Come si intuisce, il prezzo della semplicità delle operazioni di cambio delle ruote monoblocco è ben alto, ed oltre a rendere estremamente felici i produttori di sale montate rischia anche di prosciugare le ben scarse risorse dei gestori delle flotte. Questa operazione, infatti, non si può fare "in house" richiedendo pompe ad alta pressione per lo scalettamento, presse per il calettamento (o grandi forni nel caso le ruote monoblocco vengano calettate a caldo), torni per "riprendere" gli assili, etc. Ne risulta, quindi, che le sale con le ruote monoblocco, magari smontate in una piccola o media officina, vanno inviate verso un centro riparatore "centralizzato" che di mestiere fa solo quello. Quindi un gran giro di logistica, magazzini pieni di sale di ricambio pronte, ritardi, costi, etc.

Le ruote monoblocco hanno quindi soddisfatto i bisogni primari dei gestori di flotte: si manda fuori il lavoro di cambio delle ruote, noi abbiamo a magazzino delle sale pronte per la sostituzione, tutto si risolve con l'ordine a qualche ditta di manutenzione sale certificata che si occupa di tutto. Seguendo i principi del *lean manufacturing*, o produzione snella, sembra l'uovo di Colombo: peccato che questo abbia un costo sempre più insostenibile.



Al sottoscritto è capitato di vedere delle sale, giunte al naturale limite di usura, partire su un camion da una città italiana per raggiungere l'officina di manutenzione della Repubblica Ceca. Forse c'è qualcosa che non va.

Perché 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 cerchiate, 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 cerchiate erano inidonee 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 cerchiate 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 cerchiate, 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 cerchiate. È bene ricordare che la partecipazione ai gruppi di nor-

mazione è volontaria e non retribuita, e che nessun produttore di ruote ferroviarie (ovviamente monoblocco) aveva alcun interesse a reintrodurre una soluzione che lo 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 cerchi, che verrà dettagliato nel successivo paragrafo.

Abbiamo quindi constatato come la manutenzione delle ruote cerchiato sia particolarmente onerosa. Questo è facilmente dimostrabile dicendo che essa richiede almeno una macchina utensile generica (un tornio frontale o un tornio verticale di medie dimensioni) e spesso una macchina utensile speciale (il cosiddetto “tornio sale”). Ora, non è qui il caso di descrivere nel dettaglio il ciclo di manutenzione delle sale cerchiato, che per il semplice fatto di prevedere della lavorazioni per asportazione di truciolo alle macchine utensili non può essere fatto sul territorio ma solo in alcuni centri specializzati. Le macchine utensili, infatti, richiedono manodopera altamente specializzata e sono grandi, pesanti e costose (una delle caratteristiche fondamentali delle macchine utensili è la rigidità, che obbliga quindi a grandi dimensioni e costi).

Ci si potrebbe chiedere perché le sale con ruote cerchiato non abbiano beneficiato di alcun progresso tecnologico. L’analisi di mercato spiega facilmente questa “mancanza di aggiornamento”:

- 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 né 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. Le sale arrivano sovente 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.

Figura 2 - A sinistra: officina con macchine utensili tradizionali per lavorazioni completamente manuali su sale cerchiato (foto dell’autore, Italia, 2018).



ruote e binari



Gli autori hanno esaminato la pratica manutentiva di diversi esercenti che usano veicoli ferroviari, metropolitani e tranviari con ruote cerchiato riscontrando le diversità e, soprattutto, gli anacronismi della manutenzione delle sale cerchiato¹. Un esempio piuttosto lampante dell'arretratezza delle condizioni di lavoro è mostrato in Figura 2.

Ma i principi della meccanica?

La meccanica è basata sul principio dell'intercambiabilità. Se un pezzo si usura o si rompe (pensiamo alla pompa dell'acqua di una lavatrice o alle pastiche dei freni di una macchina) si chiama il (o si va dal) meccanico e questi compie sempre le medesime operazioni: smonta, pulisce, rimonta, controlla. Non è richiesto che un meccanico abbia esperienze di metrologia, di lavorazione alle macchine utensili, di comportamento termico o meccanico dei materiali: il meccanico ripara e basta. Il meccanico adopera utensili, anche complicati, ma non deve avere conoscenze in campi diversi da quelli che prevedono l'uso delle apparecchiature dedicate al lavoro che deve svolgere. Da questo punto di vista le sale montate contravengono a tutte le regole della meccanica: sono pezzi continuamente "aggiustati": il diametro della ruota monoblocco (o del centro ruota delle ruote cerchiato) è "adattato" al diametro delle portate dell'assile, il diametro del cerchio è adattato al diametro del centro ruota nelle ruote cerchiato. Tutto questo è un totale controsenso: è come se, al momento di cambiare una gomma della macchina, il cerchio dovesse essere montato su un tornio e lavorato...



Per eliminare i problemi di sostituzione dei pezzi usurati o rotti, gli ingegneri hanno inventato le "tolleranze". Nessun pezzo è uguale al suo (apparentemente) gemello prodotto un attimo prima o un attimo dopo, l'importante è che "si somiglino abbastanza". Se questa condizione si verifica ecco che esiste l'intercambiabilità senza bisogno di aggiustaggi ad hoc che fanno diventare ogni pezzo un pezzo speciale.

Possibile che questa legge base della meccanica non sia mai stata pensata o applicata alle sale montate?

Ancora una volta non è qui il caso di entrare troppo nei dettagli: diciamo solo che per motivi storici i pezzi che si smontano possono danneggiare, e spesso lo fanno, i pezzi adiacenti. Prendendo gli esempi sopra, è come se smontando la pompa della lavatrice si rovinasse anche il motore, o se togliendo le pastiglie dei freni si danneggiassero anche i dischi.

Nel caso delle ruote monoblocco abbiamo già visto che lo smontaggio può far "griappare" la ruota sulla portata dell'asse, obbligandolo alla ritornitura ed, in ultimo, allo scarto; nelle ruote cerchiato la rimozione del cerchio con cannello o con sega alternativa porta quasi sicuramente rovinare il centro ruota, obbligandolo alla ritornitura ed, in ultimo, allo scarto.

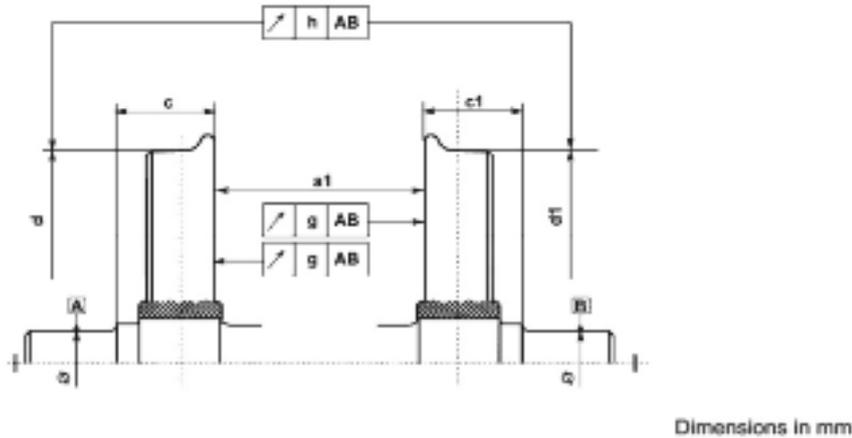
Sembra quindi che non ci sia scampo: quando le smonto le ruote si rovinano, rovinano gli assi e poi devo buttare via tutto. Una strada senza sfondo, apparentemente.

Ebbene, con il presente lavoro dimostreremo (abbiamo dimostrato) che esiste una via semplice e funzionale a patto di utilizzare i mezzi che la moderna tecnologia ci mette a disposizione (in realtà sono a disposizione almeno da 40 anni...).

Con il metodo proposto, infatti, si rientra nelle tolleranze garantibili da un tornio sale la cui precisione, peraltro, è assolutamente in eccesso rispetto a quanto richiesto.

L'ingegnere meccanico è abituato a gestire gli errori: già l'idea di *tolleranza* lascia capire che certe deviazioni, purché sotto controllo e ben gestite, sono tollerate. Orbene, una sala tornita sul tornio sale ha dimensioni con deviazioni (spannometricamente) dell'ordine di un decimo di mm, mentre la norma che indica le dimensioni dopo lavorazione (EN 13260) consente ("tollerata") errori ben più grandi (Figura 3). La sfida più grande di questo progetto era, quindi, la seguente: è possibile, utilizzando le

Figura 3 - Tolleranze ed errori massimi dopo il montaggio di una sala montata (estratto da EN 13260).



Description	Symbol	Category 2		Category 1
		a	b	
Distance between the internal wheel faces ^a	a_1	+2 ^b 0		+2 ^b 0
Difference in distances between the internal face of each wheel and the plane on the journal side defining the corresponding collar bearing surface	$c - c_1$ or $c_1 - c$	< 1		< 1
Difference in tread circle diameter	$d - d_1$ or $d_1 - d$	≤ 0,5	≤ 0,3	≤ 0,3
Radial run-out in tread circle	b	< 0,5	< 0,3	< 0,3
Axial run-out of the internal wheel face ^a	g	≤ 0,8	≤ 0,5	≤ 0,3

^a Measurement at 60 mm beneath the top of the flange
^b The tolerances may be changed for special designs of wheelsets

normali attrezzature di una modesta officina di campagna con in più un semplice ed economico riscaldatore ad induzione, montare cerchioni completamente finiti sui centri ruota esistenti rientrando nelle tolleranze richieste dalle normative in vigore?

Sviluppo della soluzione finale

La soluzione finale non è, ovviamente, la ruota monoblocco.

Questa è costosa, si può montare e smontare con apparecchiature costose e pesanti, ed è, diciamo, un enorme spreco che filosoficamente (ma soprattutto economicamente!!!) non è più accettabile.

D'altronde la soluzione finale non è, ovviamente, la ruota cerchiata come l'abbiamo sempre conosciuta, che richiede delle macchine utensili (sic!) e degli operatori altamente specializzati che conoscono la meccanica fine e non sono dei semplici meccanici.

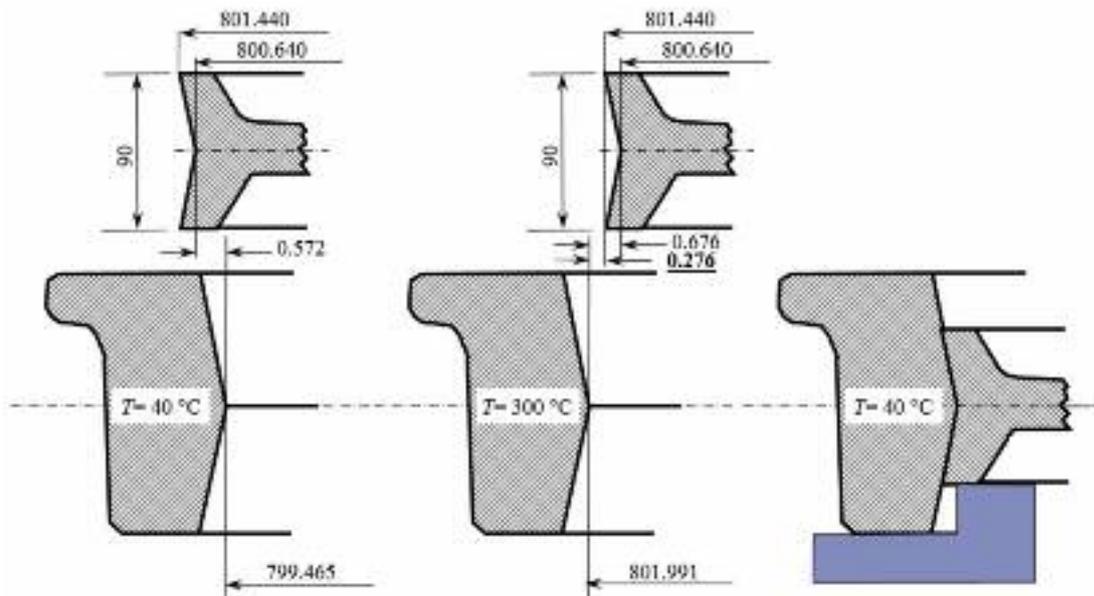
Vediamo adesso qual è stato lo sviluppo della geometria dell'accoppiamento cerchione-centro ruota che ha consentito di sovvertire l'intera catena di operazioni di manutenzione.

La prima soluzione individuata

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:



Figura 4 - Posizione relativa di centro ruota e cerchi 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



La soluzione individuata inizialmente era quella riportata in Figura 4, relativa ad un accoppiamento a coda di rondine simmetrica².

- occorre 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 cippi;
- 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.

Come si osserva, si era mantenuta anche l’interferenza richiesta dalle norme nazionali “storiche” tutt’ora in vigore, in quanto l’ottimizzazione degli spessori dei cerchi e delle tensioni di calettamento³ non viene illustrata nella presente memoria.

Figura 5 - Effetto di una forza laterale applicata al bordino ed effetto sulle superfici a coda di rondine accoppiate

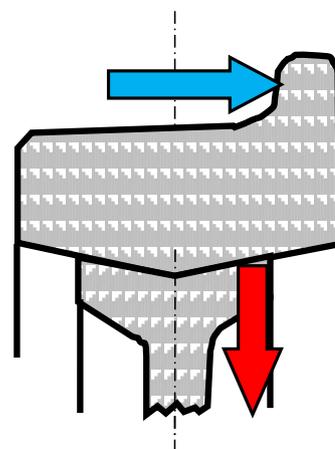
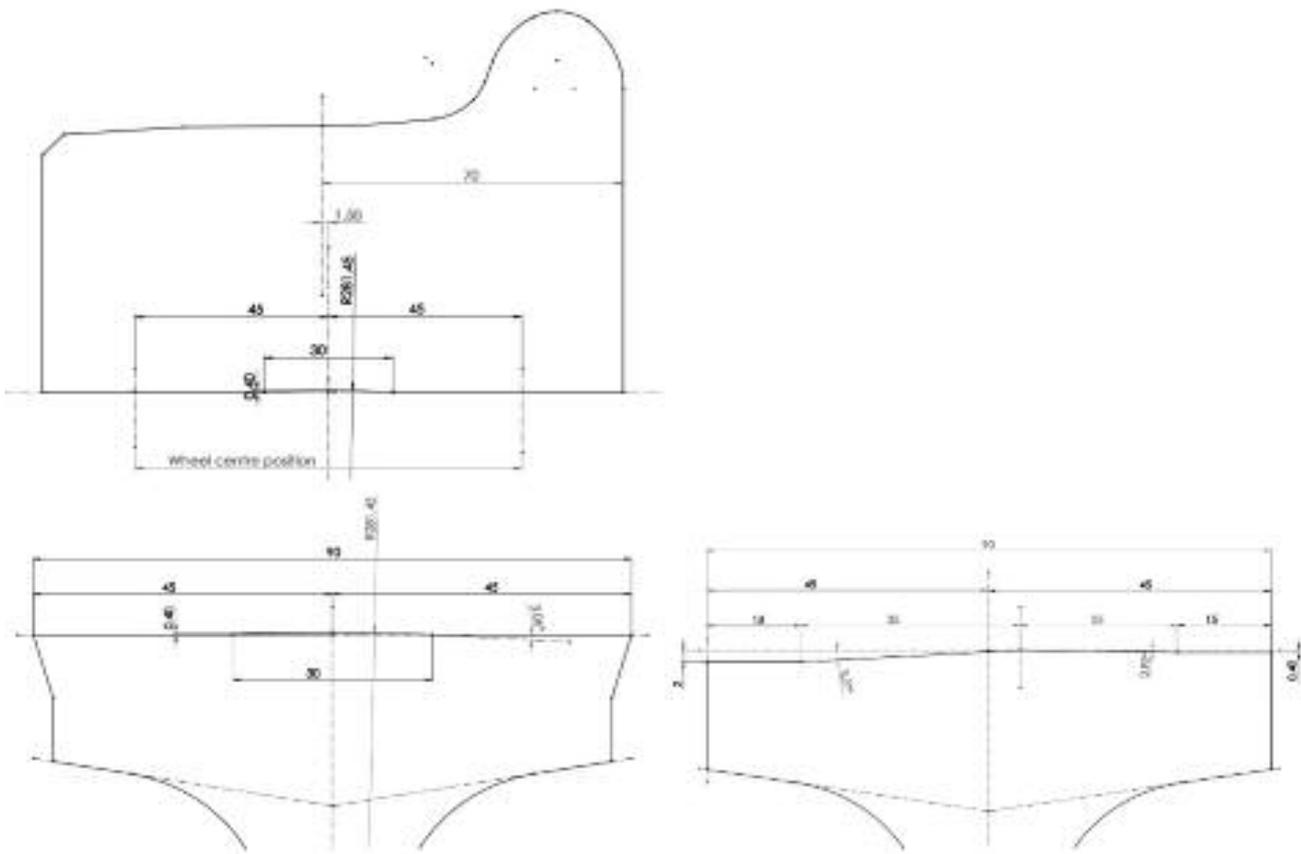


Figura 6 - A sinistra: accoppiamento toroidale simmetrico. A destra: accoppiamento a coda di rondine asimmetrico



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

- con la usuale conformazione dei centri ruota, che hanno una “vela” centrale, 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 5);
- 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 deviatori), 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 ed, in ogni caso, concentrare le forze sulla

parte centrale dell'accoppiamento e non sulle estremità.

1.1 Le soluzioni testate in linea sulla ALn668.1036 di TRENORD

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 6):

- un accoppiamento simmetrico, con superfici toroidali, di semplicissima realizzazione alla macchia utensile, sulle sale di un carrello;
- un accoppiamento asimmetrico, con coda di rondine rovesciata rispetto a quanto visto precedentemente, sulle sale dell'altro carrello.

Naturalmente l'approntamento delle sale ha richiesto alcune cautele d'officina, 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



ruote e binari

Figura 7 - 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 8 - La ALn668.1036 sul ponte girevole del deposito di Iseo, il 21 Novembre 2018



Figura 9 - Una bella immagine scattata lungo le rive del lago di Iseo durante una sosta per motivi di esercizio il 21 Novembre 2018



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 7.

I dettagli dell'attività sperimentale esulano dal presente contesto⁴, anche se per completezza si riportano in Figura 7, Figura 8 e Figura 9 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 cerchioni privi di qualunque spallamento convenzionale e del cerchietto di sicurezza. Durante le prove in linea è stata misurata la temperatura dei ceppi e dei cerchioni, come illustrato in Figura 10.

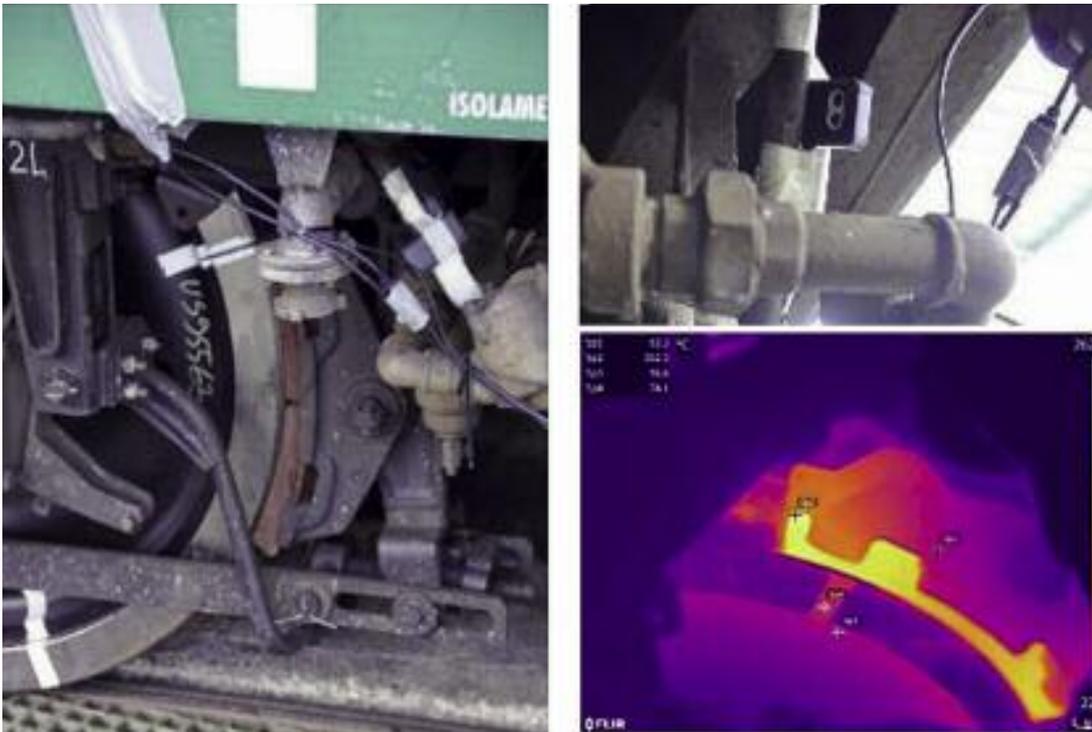
La sperimentazione condotta sulla ALn668.1036 ha consentito di concludere che:

- è possibile lavorare preventivamente cerchioni e centri ruota ed ottenere un accoppiamento che rispetta geometricamente tutte le tolleranze normative richieste;
- se il cerchione viene rimosso correttamente, 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).

La seconda soluzione individuata

Nonostante la sperimentazione effettuata avesse fornito risultati lusinghieri, l'officina ha fornito preziosi suggerimenti per migliorare le

Figura 10 - 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

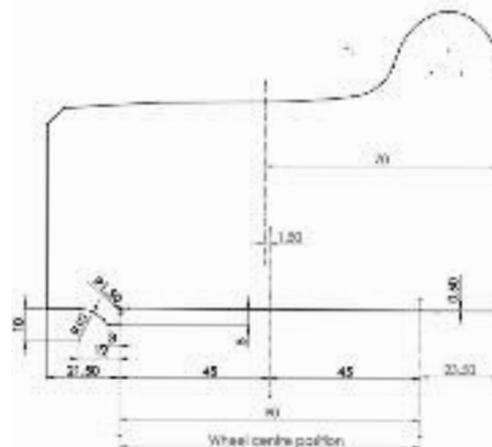


lavorazioni ed il montaggio. È risultato infatti che:

- 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. 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.

Figura 11 - Geometria definitiva del cerchione, con una conicità di 1:75 ed uno spallamento di ridotte dimensioni



ruote e binari



La forma definitiva dell'accoppiamento è desumibile dal disegno del cerchione, riportato in Figura 11. Come si osserva, questa geometria "spalma" uniformemente la forza laterale sulla superficie conica, richiedendo un centro ruota con una "vela" particolarmente spessa o, meglio, un centro ruota con due vele. Peccato che un siffatto centro ruota non sia ottenibile per forgiatura e laminazione come gli usuali centri ruota.

Andava quindi sviluppato un centro ruota con una geometria nuova che obbligava ad utilizzare tecnologie ed un pensiero "nuovi". Questo ha portato ad un centro ruota con un concetto completamente diverso che verrà mostrato nella seconda parte di questo articolo.

"Ma siamo sicuri?"

La domanda è: ma siamo sicuri che una volta fatto il cambio cerchioni la sala sia "ben fatta" e, soprattutto, sicura?

Abbiamo lasciato questa domanda alla fine dell'articolo non tanto perché ce ne fossimo dimenticati, ma perché volevamo prima descrivere la parte "meccanica" e poi la parte "strutturale" e le "tolleranze".

In merito alle tolleranze abbiamo già detto, e non ci ripeteremo. Ma il vero dilemma è se il cerchietto di sicurezza sia veramente necessario *in una ruota cerchiata convenzionale*. A nostro modo di vedere no, lo è solo se si verifica una assolutamente improbabile somma di condizioni, ovverosia:

- la frenatura a ceppi è talmente energica da riscaldare il cerchione al punto da fargli perdere tutta l'interferenza di calettamento;



- la ruota riceve una forza verso l'esterno (ad esempio al transito sul cuore di uno scambio⁵);

- questa forza dura così tanto che è in grado di far uscire il cerchione che è montato sul centro ruota per circa 90 mm.

Modernamente, l'analisi del rischio porta a concludere che la frequenza di occorrenza di questo pericolo è "altamente improbabile" (v. EN 50126-1:2017). Si potrebbe quindi, in maniera nient'affatto peregrina, sostenere che i moderni metodi di analisi del rischio (v. l'applicazione dei regolamenti 402/2013 e 2015/1136 sul *Common Safety Method*) portano a negare la necessità del cerchietto di sicurezza. Ben consci, però, di quanto sia conservativo (ed a volte, duole dirlo, persino ottuso) il mondo ferroviario, si è deciso di lasciare un accoppiamento "positivo" (conico, cioè di forma) nella direzione delle forze minori (verso l'esterno) e una battuta (spallamento) nelle direzioni delle forze maggiori (verso l'interno).

Occorrerebbero molte pagine per mostrare, con raffinati calcoli agli Elementi Finiti nel dominio elastoplastico delle grandi deformazioni⁶, i risultati della valutazione su cosa può succedere all'atto dell'applicazione di una forza laterale *verso l'esterno* (ad esempio nel transito sui deviatoi). Basti qui accennare che 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". Occorre doverosamente precisare che i calcoli sono stati effettuati *a partire dalla condizione di interferenza nulla*, cioè nell'ipotesi (irrealistica nella maggior parte dei veicoli viaggiatori e delle locomotive), che la frenatura abbia completamente "allentato" termicamente il cerchione prima di applicare la forza laterale. Ne è scaturito che la soluzione proposta richiede una forza laterale per provocare lo scorrimento in tale direzione del cerchione che è maggiore di quella necessaria per "tagliare" il cerchietto di sicurezza.

Quindi, dal punto di vista della sicurezza, eliminare il cerchietto non comporta un incremento del rischio. L'*assessment* di sicurezza utilizzando il *Common Safety Method* risulta quindi superato e l'utilizzo del cerchione conico senza cerchietto di sicurezza può essere ammesso senza restrizioni

Conclusioni

Abbiamo mostrato (e dimostrato) come una nuova geometria di accoppiamento cerchione-centro ruota possa rinverdire i fasti della ruota cerchiata. La soluzione finale è una ruota cerchiata “speciale ma semplice”, che ha le seguenti caratteristiche e vantaggi:

- è una ruota cerchiata, quindi si cambia solo il cerchione senza buttare via inutilmente quintali di preziosissimo acciaio finemente lavorato, controllato, verniciato, etc.;
- il cerchione è accoppiato al centro ruota non con “il solito” accoppiamento cilindrico “come abbiamo sempre fatto”, ma con un semplice accoppiamento conico con conicità 1:75 (quindi “autobloccante”) ed un piccolo spallamento laterale;
- questo consente di eliminare completamente il cerchietto, con l’eliminazione di tutte le operazioni che richiedono la sua tornitura e rimozione;
- lo smontaggio del cerchione usurato avviene per riscaldamento ad induzione dello stesso con macchine semplicissime, senza danneggiare il centro ruota che quindi non va mai rilavorato (= vita infinita!!!!);
- visto che il centro ruota non si smonta mai anche l’assile non va mai rilavorato (= vita infinita!!!)⁷;
- il centro ruota è lavorato (con tolleranza ISO t7) ed i cerchioni vengono approvvigionati completamente lavorati (con tolleranza ISO S8) con lavorazioni assolutamente routinarie, quindi spariscono torni, presse, olio in pressione per lo scalettamento, etc.

La sequenza di cambio dei cerchioni diviene quindi straordinariamente semplice:

- arriva un veicolo in officina con i cerchioni al limite di usura o con sfaccettature gravi: tutto ha una fine e va cambiato;
- si “tira giù” la sala, operazione che in officina i meccanici sanno fare perfettamente;
- si riscaldano ad induzione i cerchioni usurati (uno alla volta, con induttori a cavo raffreddato portatili, economici e praticissimi) e si smontano senza minimamente toccare i centri ruota;
- si riscaldano ad induzione i cerchioni nuovi (uno alla volta, con i medesimi induttori di cui sopra o con altri fissi) e si “appoggiano” sul piccolo spallamento sopra citato, attendendo che raffreddandosi facciano presa;
- dopo circa 4 ore la sala montata è pronta per essere rimontata sul veicolo, operazione che i



meccanici fanno regolarmente.

I principi esposti nel presente articolo e i felici esiti della prima sperimentazione hanno dato lo spunto per un approccio nuovo e più economico (sia di acquisto che manutentivo) all’approvvigionamento dei centri ruota, producendo un centro ruota completamente nuovo che verrà descritto nella seconda parte di questo articolo.

¹ Si veda la memoria A. Bracciali, G. Megna: *Re-design of tyred wheels to optimize maintenance*, in Atti della Fourth International Conference on Railway Technology, Railways 2018, 3-7 September 2018, Sitges, Barcelona, Spain.

² Anche in questo caso si veda la memoria A. Bracciali, G. Megna: *Re-design of tyred wheels to optimize maintenance*, in Atti della Fourth International Conference on Railway Technology, Railways 2018, 3-7 September 2018, Sitges, Barcelona, Spain.

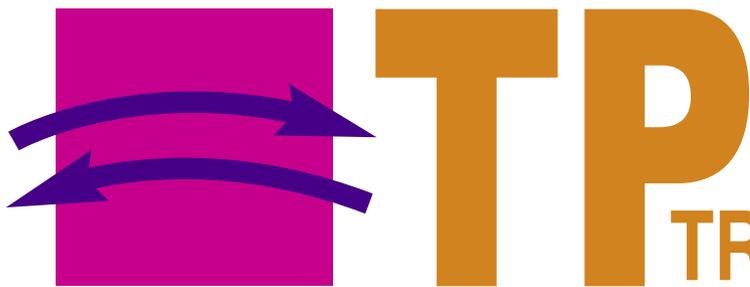
³ Si veda A. Bracciali, G. Megna: *Tyred wheels without braking: structural optimization*, in Atti della Fourth International Conference on Railway Technology, Railways 2018, 3-7 September 2018, Sitges, Barcelona, Spain.

⁴ Per i dettagli si veda A. Bracciali, G. Caianiello, G. Megna, P. Petreschi, L. Rota: *Dovetail Tyred Wheels – Application to a DMU*, in Atti del XIX International Wheelset Congress, Venezia, 16-20 giugno 2019.

⁵ Non ci dimentichiamo che sul binario corrente il bordinio è un vincolo *monolatero*, cioè la rotaia può spingere il cerchione solo nel verso di “chiudere” la sala montata e mai di aprirla. Considerazioni più complesse (non descrivibili qui) indicano che anche nella marcia in curva le forze maggiori, date dalla sala anteriore (*gauge spreading forces*) tendono a chiudere la sala.

⁶ Si veda a questo proposito A. Bracciali, G. Megna, *Dovetail Tyred Wheels – Application to a DMU*, Atti del XIX International Wheelset Congress, Venezia, 16-20 Giugno 2019.

⁷ Può esservi la necessità di smontare le ruote per accedere agli altri componenti montati sull’asse, quali dischi freno e/o riduttori. Per gli assi portanti, l’uso di dischi a settori o di dischi montati in cartella riduce a zero la necessità di smontare le ruote dall’asse.



Anno XXXIV - Luglio/Agosto 2019

TRASPORTI PUBBLICI



INNOVAZIONI: TRA PRESENTE E FUTURO

trasporti regionali e urbani • sistema tram • cybersecurity

Trasporti regionali

4 INTERVISTA AD ELISA DE BERTI ,
ASSESSORE AI TRASPORTI
DELLA REGIONE VENETO
di Stefano Vallani

Trasporti urbani

7 IL FUTURO DELLA MOBILITÀ
URBANA NEI SISTEMI
ALTERNATIVI ECOLOGICI:
IL MODELLO ANM
di Nicola Pascale

9 MESSINA, LA SFIDA
DEI TRASPORTI PUBBLICI
di Gianluca Rossellini

Inchiesta

13 IL PANORAMA TRAMVIE E
METROPOLITANA LEGGERA
IN EUROPA
di Laurent Dauby

Ruote e binari

18 IL RITORNO DELLE RUOTE
CERCHIATE?
di Andrea Bracciali, Gianluca Megna

Cybersecurity

30 LA CYBERSECURITY SU RUOTE:
IL TRENO COME SISTEMA
CYBERFISICO
di Giorgio Pizzi

Sistema tram

38 I CAMPI DI IMPIEGO
URBANISTICO DEL TRAM E
DELLE TECNOLOGIE ALTERNATIVE
di Renzo Emili

47 INNOVAZIONI... GIÀ VISTE
di Roberto Cambursano

Ottobre

