



# Materiali innovativi nel progetto del telaio del carrello

## *Innovative materials in the bogie frame design*

Luigi VENTURA <sup>(\*)</sup>

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.11.2022.ART.1.>)

**Sommario** - Lo scopo di questo documento è focalizzato sui materiali utilizzati per la fabbricazione dei telai dei carrelli ferroviari.

Il documento evidenzierà i materiali ammissibili e innovativi dopo aver discusso i materiali tradizionali relativi alla produzione di questo sottosistema vitale del materiale rotabile.

Recentemente l'ottimizzazione progettuale è fondamentale in tutti i settori automotive, anche in ambito ferroviario. Per questo motivo i costruttori di veicoli ferroviari sono stati impegnati in un processo di innovazione del veicolo ferroviario, riduzione dei costi, del peso, dell'utilizzo dei materiali e dell'impatto ambientale durante la produzione e il servizio dei componenti.

L'ottimizzazione del telaio del carrello è interessata dalla progettazione ottimale della forma, della topologia, del materiale, della disposizione dei componenti, del calcolo della resistenza e delle caratteristiche portanti del telaio. L'autore ha scelto di analizzare la proprietà materiale indirizzata al contenimento di massa.

### 1. Introduzione

Il carrello è il sottosistema principale di un veicolo ferroviario e la sua progettazione è fondamentale per realizzare un buon progetto di tutto il veicolo ferroviario in termini di sicurezza, qualità/comfort di marcia e caratteristiche di marcia.

In questo documento l'obiettivo si focalizza sulla caratterizzazione dei materiali ammissibili che potrebbero essere adatti per la produzione del telaio del carrello (Fig. 1).

Nelle prossime sezioni, si prova ad individuare i materiali che i produttori di carrelli hanno utilizzato in passa-

**Summary** - The aim of this paper is focused on the materials used for the manufacturing of the railway bogie frames.

The paper will highlight the allowable and innovative materials after discussing the traditional materials related to the production of this vital rolling stock subsystem.

Recently the design optimization is fundamental in all the automotive sectors, also in the railway field. For this reason the rail vehicle manufacturers have been engaged in a process of rolling stock innovation, reduction of cost, weight, material usage and environmental impact during the production and operation of the components.

The optimization of the bogie frame has passed from the optimal design of shape, topology, material, the layout of components, the calculation of the strength and load-bearing characteristics of the frame.

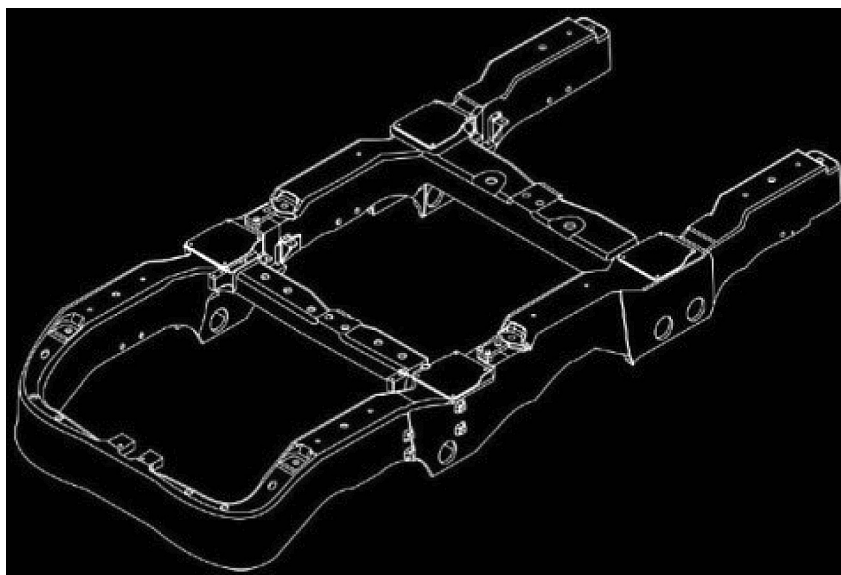


Figura 1 – Un esempio di telaio del carrello ferroviario.

*Figure 1 – Bogie frame.*

<sup>(\*)</sup> ANSFISA (Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie e delle Infrastrutture Stradali ed Autostradali)

<sup>(\*)</sup> ANSFISA (Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie e delle Infrastrutture Stradali ed Autostradali)

to fino ad ora e la possibile innovazione sulla scelta di questa proprietà fisica del componente.

I motivi per trovare materiali adatti e innovativi sono:

- la riduzione dei costi, grazie al risparmio durante il ciclo di vita del telaio del carrello;
- il ridotto consumo di risorse nella produzione, nel servizio e nella manutenzione del telaio del carrello;
- la riduzione della massa del componente con conseguenze sul comportamento dinamico;
- il miglioramento e la scelta ottimale della progettazione del carrello al fine di ottenere un potenziamento delle prestazioni in molti aspetti ingegneristici.

Dall'analisi precedente è evidente che l'interesse per l'argomento materiale è rilevante. Come nel settore aeronautico, dove i compositi iniziarono ad essere utilizzati nel 1980 per piccole parti, si prevede di migliorare i materiali utilizzati nel settore ferroviario.

Certamente, è fondamentale considerare gli aspetti specifici del settore ferroviario e dell'ambiente ferroviario. Inoltre, si deve considerare la lunga esperienza sulla fatica meccanica che crebbe in coerenza alle indicazioni di WÖHLER nel settore ferroviario in relazione alla rottura delle parti ferroviarie.

## 2. Funzioni del carrello ed effetti del peso

Il design del carrello ha conseguenze vitali qualità di marcia e comfort di marcia del veicolo ferroviario e sul comfort del passeggero del veicolo ferroviario. Infatti, il suo telaio è la prima massa sospesa dopo il contatto ruota-rotaia. Contiene i supporti, le connessioni e i fissaggi per le sospensioni (laterali e verticali), la barra antirollio, la barra di trazione, i blocchi paraurti, le sale montate attraverso i cuscinetti degli assi, i componenti frenanti e gli ausiliari. In alcuni casi il carrello è dotato di ingranaggi e motori anche se è consigliato un posizionamento in modalità doppiamente sospesa. Tutti questi componenti, installati sul telaio del carrello, hanno un impatto enorme sulle prestazioni del treno.

I principali obiettivi del carrello sono:

1. miglioramento dell'interazione dinamica tra il veicolo e i binari in curva;
2. garanzia che il veicolo rimanga all'interno dell'involucro dinamico di sicurezza e delle condizioni critiche prescritte;
3. mantenimento delle forze dinamiche a valori ammissibili tra sale montate e binario;
4. ricezione e trasmissione delle forze del peso corpo vettura;
5. resistenza ai carichi dinamici e di impatto delle sale montate derivanti dall'interazione tra ruote e binario;
6. ricezione delle forze derivanti dall'attuazione di sforzi di trazione o frenatura attraverso elementi di sospensione elastici ammortizzanti;

*The author has chosen to analyze the material property and the mass saving on this part is advisable.*

## 1. Introduction

*The bogie is the main subsystem of a railway vehicle and its design is crucial in order to achieve a good project of all the rail vehicle in terms of safety, ride quality and ride characteristics.*

*In this paper the goal is focused on the characterization of the allowable materials which could be suitable for the manufacturing of the bogie frame (Fig. 1).*

*In the next sections, we attempt to find the materials that bogie manufacturers have used in the past up to now and the possible innovation on the choice about this physical property of the component.*

*The reasons to find right innovative materials are:*

- *the reduction of costs, thanks to savings during the life cycle bogie frame;*
- *the reduced consumption of resources in the production, operation and maintenance of the bogie frame;*
- *the reduction of the component mass with consequences on the dynamic behaviour;*
- *the improvement and optimal choice of the bogie design in order to get better performances in many engineering aspects.*

*From the previous analysis it is obvious that the interest about the material topic is relevant.*

*Like in the aeronautical field, where composites started to be used in 1980 for small parts, it is foreseen to improve the materials used in the railway field.*

*Certainly, it is vital to consider the specific aspects of the railway field and railway environment. Moreover, we should consider the long experience about fatigue that grew with WÖHLER properly in railway field about the rupture of railway parts.*

## 2. Bogie Functions And Weight Effects

*The bogie design has vital consequences on the ride quality and ride comfort of the railway vehicle. Indeed, its frame is the first once suspended mass after the wheel-rail contact. It contains the supports, lugs and fixings for the suspensions (lateral and vertical suspensions), anti-roll bar, traction bar, bumper stops, the wheelsets through axle-bearings, braking components and auxiliaries. In some cases, the bogie is equipped with the gear and motors even if it is better to put them in a double suspended/sprung manner.*

*All those components that are installed on the bogie frame have a huge impact on the train performances.*

*The main aims of the bogie are:*

1. *improving of the dynamic interaction between the vehicle and the curved tracks;*

7. avere la resistenza e la durata necessarie contro i carichi provenienti da motori di trazione da meccanismi di ingranaggi di trazione (giunti sospesi, alberi di trasmissione e riduttori) da meccanismi di frenatura.

Dall'esperienza maturata durante l'innovazione del materiale rotabile è possibile elencare i parametri del carrello che hanno un forte impatto sulla velocità critica del veicolo ferroviario (Tab. 1). La velocità critica è legata al serpeggio e alla dinamica del veicolo. Il problema è il compromesso tra la qualità di marcia e l'iscrizione in curva del carrello. Di solito, quando i produttori dei veicoli migliorano la dinamica (in rettilineo), essi peggiorano il comportamento in curva. Come riportato nel [1] il progettista potrebbe agire su questi parametri fisici per aumentare o ridurre la velocità critica, secondo la tabella.

Il progetto futuro del telaio del carrello prevede le seguenti implementazioni progettuali:

1. riduzione del peso del telaio del carrello;
2. eliminazione dell'instabilità all'imbardata ad alta velocità;
3. riduzione della massa del veicolo;
4. riduzione della resistenza al rotolamento del veicolo;
5. diminuzione dell'usura del profilo della ruota;
6. limitazione del consumo di energia del veicolo ferroviario;
7. riduzione del rumore esterno ed interno;
8. limitazione dei costi operativi.

A parità di velocità, la riduzione della massa riduce l'usura di ruote e rotaie. Inoltre, i sistemi di frenatura hanno benefici dalla riduzione della massa del veicolo.

La massa del telaio del carrello deriva da uno studio di resistenza meccanica statica e a fatica. Il materiale, la forma della sezione trasversale e la topologia sono fondamentali per stimare le sollecitazioni. I carichi sul telaio del carrello dipendono dai componenti installati (motori e sospensioni) e strettamente dal tipo di esercizio a cui il veicolo è destinato (ad esempio alta velocità, carro merci), soprattutto dalle caratteristiche di velocità e carico assiale.

In generale, la differenza principale viene fatta tra il carrello motore e il carrello portante.

Per lo stesso veicolo ferroviario, il carrello motore è solitamente più pesante del carrello portante, quindi la massa del telaio del carrello motore è più elevata; questo accade nel caso in cui i motori siano installati sul carrello

2. *assurance the vehicle remains within its prescribed dynamic safe envelope and critical conditions;*
3. *maintaining values of the dynamic forces between wheelsets and track;*
4. *receiving and transmitting the forces of the car body weight;*
5. *withstanding the dynamic and impact loads from wheelsets resulting from interaction between wheels and track;*
6. *receiving the forces from implementation of traction or braking efforts through elastic-damping suspension elements;*
7. *having the necessary strength and durability against the loads from traction motors, traction gear mechanisms (suspended joints, drive shafts and gear boxes) and braking mechanisms.*

*From the experience gained during the innovation of the rolling stock, it is possible to list the bogie parameters that have a large impact on the critical speed of the rail vehicle (Tab. 1).*

*The critical speed is related to the hunting and dynamic of the vehicle.*

*The problem is the trade-off between the ride quality and the curve negotiation of the bogie. Usually, when manufactures improve dynamics they get worse the curving behaviour.*

Tabella 1 – Table 1

Tendenze tra variazione parametri e velocità critica  
*Trends between parameters change and critical speed*

<b>Variazione della quantità fisica</b> <i>Physical quantity variation</i>	<b>Tendenze velocità critiche</b> <i>Critical speed trends</i>
Spaziatura assi ↑ <i>Axle spacings ↑</i>	↑
Carico assiale ↑ <i>Axial load ↑</i>	↑
Conicità della ruota ↓ <i>Conicity of the wheel ↓</i>	↑
Smorzatori di deriva (uso) <i>Yaw dampers (usage)</i>	↑
Peso del telaio ↑ <i>Frame weight ↑</i>	↓
Momento d'inerzia della deriva del carrello con telaio ↑ <i>Yaw inertia moment of frame bogie ↑</i>	↓
Massa dell'asse ↑ <i>Axle mass ↑</i>	↓
Momento d'inerzia della deriva dell'asse ↑ <i>Yaw inertia moment of axle ↑</i>	↓
Valori non ottimali delle rigidità <i>Non optimal values of stiffnesses</i>	↓

lo (il motore è una massa una volta sospesa/massa semplicemente sospesa) o quando il motore è installato sulla cassa (il motore è massa sospesa due volte/massa doppiamente sospesa) e il ponte di trasmissione è fissato sulla sala montata e passa attraverso il telaio del carrello.

Tra i tipi di carrelli che hanno effetti sulla massa del telaio del carrello, è anche degno di nota menzionare i carrelli a ruote indipendenti. Queste architetture presentano un peso inferiore, minore spinta laterale nelle curve e relativa forza centrifuga, autoregolazione della velocità di rotazione delle ruote con minore usura. Tuttavia, i carrelli a ruote indipendenti possono soffrire di problemi di frequente risalita del bordino sul fianco della rotaia senza alcun effetto di richiamo gravitazionale; al contrario questa condizione avviene nella sala tradizionale e aiuta la centratura della sala sul binario utilizzando il peso e il baricentro della sala stessa.

### 2.1. Effetti del peso sul trasferimento del carico

La disposizione del carrello e alcune sue caratteristiche hanno un forte impatto sul trasferimento del carico tra gli assi del veicolo. È possibile comprendere alcuni comportamenti del veicolo ferroviario a 4 sale montate nell'esempio successivo (Fig. 2). Il peso lordo del veicolo è "P", la distanza tra le sale montate è "p", la distanza tra i carrelli (passo carrello) è "i", (interperno) l'altezza "H" è la distanza del baricentro della cassa dal piano della rotaia, "h" è l'altezza dalla rotaia al perno della sospensione secondaria. A causa di questo fenomeno il carico viene trasferito da una sala all'altra. Il carico statico  $\frac{P}{4}$  sulle sale montate viene modificato mediante due contributi sull'equazione: il trasferimento del carico tra il carrello anteriore e quello posteriore del veicolo ed il contributo del trasferimento del carico le sale montate di uno stesso sul carrello. Il contributo maggiore è il trasferimento del carico sul carrello, perché la distanza tra i carrelli è superiore alla distanza tra le sale montate ( $i > p$ ).

*Like it is reported in the (1) the designer could act on these physical parameters to increase or reduce the critical speed, according to the table.*

*The future project of the bogie frame forecasts the following design implementations:*

1. *reduction of the bogie frame weight;*
2. *deletion of the yaw instability at high speed;*
3. *reduction of the vehicle mass;*
4. *reduction of the rolling resistance of the vehicle;*
5. *diminution of the wear of the wheel profile;*
6. *limitation of the energy consumption of the rail vehicle;*
7. *reduction of the external and internal noise;*
8. *limitation of the operational costs.*

*Assuming the same speed, the mass reduction brings less wear of wheels and rails. Besides, the braking systems has benefits from the vehicle mass reduction.*

*The mass of the bogie frame comes from a static and fatigue mechanical strength study. The material, the cross-section shape and the topology are fundamental to estimate the stresses. The loads on the bogie frame depends on components which are installed on the bogie (motors and suspensions), and the loads are strictly dependent on the type of vehicle (for instance high speed, freight wagon), above all on the characteristics of speed and axial load.*

*In general, the main difference is made between motor bogie and trailer bogie.*

*For the same rail vehicle, the motor bogie is usually heavier than trailer bogie, thus the bogie frame mass of motor bogie is higher; this happens in case the motors are installed on the bogie (motor is an once sprung mass simply suspended mass) either when motor is installed on the car (motor is twice sprung mass/doubled suspended mass) and the gear box is fixed on the wheelset passing through the bogie frame.*

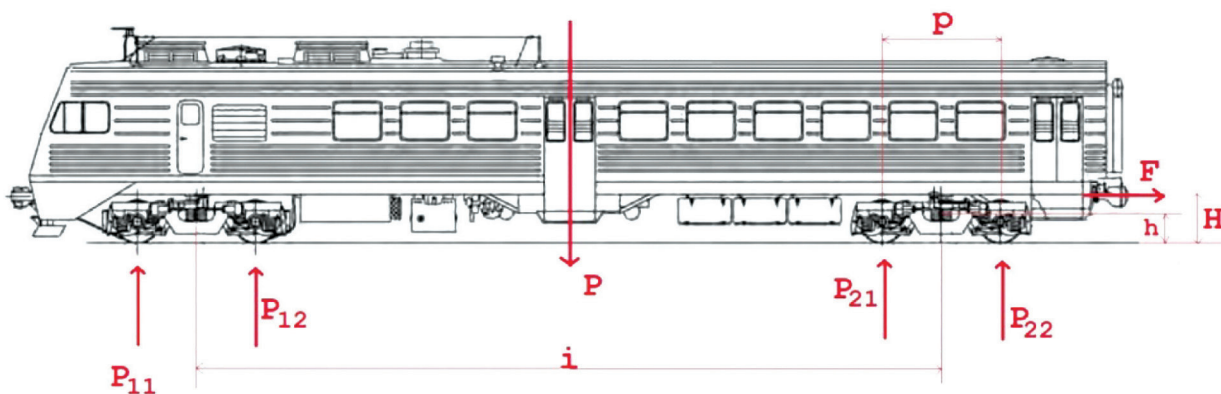


Figura 2 – Schema di equilibrio delle forze per un veicolo in marcia soggetto a massa trainata.

Figure 2 – Transfer load.



$$\Delta F = \pm \frac{F \cdot (H-h)}{2 \cdot i} \pm \frac{F \cdot h}{2 \cdot p} \quad (1)$$

Si preferiscono valori bassi di “h” basso e “H” basso. Questa conclusione ha portato alla costruzione di carrelli con una geometria mostrata in Fig. 3. Per la dimensione di “p”, occorre fare un compromesso. Con “p” esteso, si ottiene una velocità critica alta. Quando lo stesso parametro geometrico viene aumentato dal progettista, l'iscrizione in curva è peggiore e viene prodotto un carrello più grande, quindi un peso maggiore del telaio del carrello.

## 2.2. Effetti del peso sull'equazione dinamica

La massa M del sistema vincolato multi-corpo ha un effetto rilevante sull'equazione del movimento dinamico:

$$\begin{aligned} M \cdot \ddot{q} &= Q - C_q^T \cdot \lambda \\ M \cdot \ddot{q} &= Q_e + Q_v - C_q^T \cdot \lambda \end{aligned} \quad (2)$$

Nell'equazione (2):

- M è la matrice di massa del sistema;
- $\ddot{q}$  è il vettore delle derivate seconde delle coordinate coordinate generalizzate, quindi raccoglie le accelerazioni;
- $Q_e$  è il vettore di forze esterne generalizzate. Contiene il contributo reale delle forze esterne associate alle coordinate traslazionali e rotazionali;
- $Q_v$  è il vettore delle forze d'inerzia che hanno una relazione quadratica con la velocità. Di solito, raccoglie alcuni contributi non ideali, ad esempio accelerazioni non ideali;
- $\lambda$  è il vettore dei moltiplicatori di Lagrange che sono le reazioni ideali dei vincoli;
- $C_q$  è la matrice Jacobiana delle equazioni di vincolo;
- $C_q^T \cdot \lambda$  contiene le forze di vincolo generalizzate dovute ai gradi di libertà bloccati nel sistema.

Dall'equazione del moto è possibile comprendere che per l'equilibrio più elevati sono i termini sul lato sinistro dell'equazione, più elevati dovrebbero essere i contributi sul lato destro.

Una massa più elevata del sistema vincolato provoca forze generalizzate più elevate. Queste azioni vengono scambiate attraverso il contatto ruota-rotaia. Le conseguenze dirette in effetti macroscopici nelle equazioni sono il calore nel contatto ruota-rotaia, l'usura della ruota e della rotaia (ma fondamentalmente delle ruote che sono costruite più morbide delle

Among the types of bogie that have effects on the bogie frame mass, it is also noticeable to mention the independently rotating wheels bogies. They are prone to less weight, less lateral thrust in curves and related centrifugal force, self-adjusting of the rotational speed with less wear. On the contrary independently rotating wheels bogies can suffer problems of flange climbing and no gravitational effect; this effect happens in the traditional wheelset and helps the centering of the wheelset on the track by using the weight and the centre of gravity of the wheelset itself.

## 2.1. Weight effects on the load transfer

The arrangement of the bogie and some its characteristics have a large impact on the load transfer between the axles of the vehicle. In the next example (Fig. 2) of 4 wheelsets rail vehicle, it is possible to understand some behaviours. The gross weight of the vehicle is “P”, the wheelset spacing is “p”, the bogie spacing is “i”, the height “H” from the body to the rail plan, “h” is the height from the rail to the pin of the secondary suspension.

Due to this phenomenon the load is transferred from one wheelset to another.

The static load on the wheelsets is modified by means of two contributions on the equation: the load transfer between the front and rear bogie of the vehicle; the load transfer contribution on the wheelsets of a bogie.

The higher contribution is the load transfer on the bogie because the bogie spacing is higher than the wheelset spacing ( $i > p$ ).

$$\Delta F = \pm \frac{F \cdot (H-h)}{2 \cdot i} \pm \frac{F \cdot h}{2 \cdot p} \quad (1)$$

We prefer low “h” and low “H” values. This conclusion has brought the construction of bogie with the following lateral shape (Fig. 3).

For the dimension of “p”, it needs to do a trade-off. With high “p”, high critical speed is gained. When the same geometric parameter is increased by the designer, the curve ne-

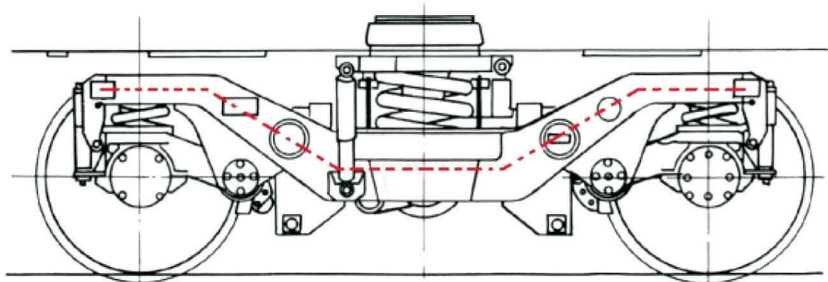


Figura 3 – Progettazione del carrello (vista laterale).  
Figure 3 – Bogie design (lateral view).

rotaie), danni strutturali e fenomeni di fatica e difetti sul binario.

Forze più elevate nell'equazione determinano anche un maggiore consumo e dissipazione di energia nel movimento del sistema vincolato multi-corpo. Da questo punto di vista, la riduzione di massa è così desiderata per la vita operativa delle ruote, delle rotaie e dei binari.

Un secondo effetto indiretto della massa si trova nell'equazione di vincolo della formulazione aumentata.

$$C_q \cdot \ddot{q} = Q_d \quad (3)$$

Nell'equazione precedente  $Q_d$  è il vettore risultante dalla differenziazione delle equazioni di vincolo di sistema.

### 2.3. Effetto del peso sulla densità spettrale di potenza

Un'analisi di sensibilità dei parametri sul sistema di sospensione ferroviaria è stata eseguita e trovata in letteratura [3]. La strategia di questa analisi è quella di modificare un parametro alla volta, mentre gli altri rimangono fissi. La modifica del parametro è stata effettuata rispetto ai valori di riferimento.

Nella Fig. 4,  $m_1$  è un quarto della massa del carrello ed  $m_2$  è un ottavo della massa della cassa.

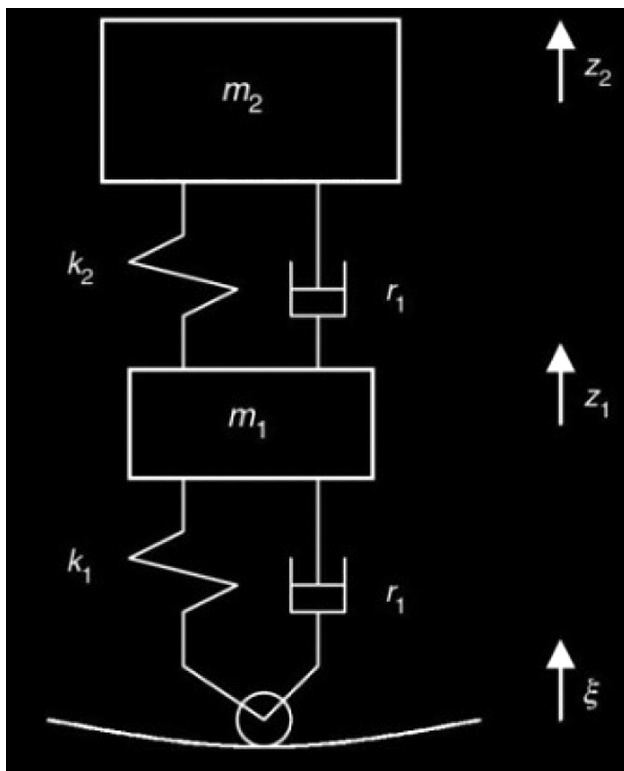


Figura 4 – Modello di sistema di sospensione ferroviaria.  
Figure 4 – Railway suspension system model.

gotiation is worse and bigger bogie is produced, thus higher weight of the bogie frame.

### 2.2. Weight effects on the dynamic equation

The mass  $M$  of the multibody constrained system has a relevant effect on the dynamic motion equation.

$$\begin{aligned} M \cdot \ddot{q} &= Q - C_q^T \cdot \lambda \\ M \cdot \ddot{q} &= Q_e + Q_v - C_q^T \cdot \lambda \end{aligned} \quad (2)$$

In the equation [2], there are:

- $M$  is the system mass matrix;
- $\ddot{q}$  is the second derivative vector of generalized coordinates, therefore it collects the generalized accelerations;
- $Q_e$  is the vector of generalized external forces. It contains the real contribution from the external forces associated with the translational and rotational coordinates;
- $Q_v$  is the vector of inertia forces which have got a quadratic relationship with the speed. Usually, it collects some not ideal contributions, for instance not ideal accelerations;
- $\lambda$  is the vector of Lagrange multipliers that are the ideal reactions of the constraints;
- $C_q$  is the jacobian matrix of the constraint equations;
- $C_q^T \cdot \lambda$  contains the generalized constraint forces due to the degrees of freedom locked in the system.

It is possible to understand from the motion equation that the higher are the terms on the left side of the equation the higher contributions should be on the right side for the balanced.

Higher mass of the constrained system causes higher generalized forces. These actions are exchanged through the wheel-rail contact.

The direct consequences of the large terms in the equations are heat in the wheel-rail contact, wear of wheel and rail (but basically wheels that are built softer than rails), structural damage and fatigue phenomena and defects on the track.

Higher forces on the equation also determine a more consumption and dissipation in the motion of the multibody constrained system. From this point of view, the reduction of mass is so desired for the operating life of wheels, rails and tracks.

A second indirect effect of the mass is found in the constraint equation of the augmented formulation.

$$C_q \cdot \ddot{q} = Q_d \quad (3)$$

In the previous equation  $Q_d$  is the vector resulting from the differentiation of the system constraint equations.

Si presume che lo spostamento  $\xi$  (irregolarità del binario) sia una variabile casuale definita da un processo stocastico stazionario ed ergodico. Sono state adottate due formule analitiche per interpolare i dati misurati che si riferiscono alla densità spettrale di potenza (PSD) del processo stocastico che definisce  $\xi$ .

Pertanto, il sistema viene analizzato utilizzando due approcci: una densità spettrale di potenza *one-slope* (1S-PSD) e *two slope* densità spettrali di potenza *slop* (2S-PSD).

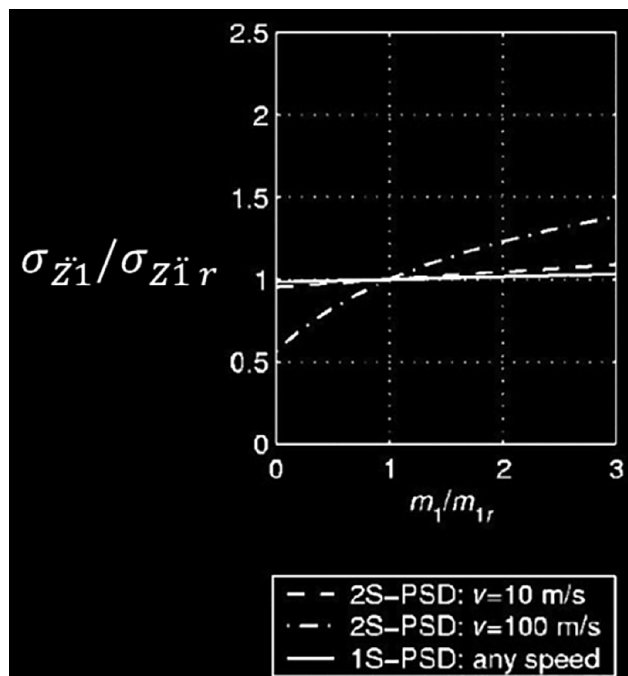
Le deviazioni standard adimensionali derivate dalle due formulazioni sono riportate di seguito.

Sono stimate sulla boccola.  $\sigma_{\ddot{z}_1}$  è il discomfort, vale a dire la deviazione standard dell'accelerazione verticale;  $\sigma_{Fz1}$  è la deviazione standard della forza verticale sulla boccola.

In questo articolo siamo interessati all'analisi della massa del telaio del carrello.

La seguente Fig. 5 mostra il comportamento del sistema quando la massa una volta sospesa viene modificata rispetto a un valore di riferimento ( $m_{r1}$ ). Maggiore è la velocità, maggiore sarà l'effetto della massa del telaio del carrello e dei componenti fissati su di esso. Un ratio di massa grande  $m_1/m_{r1}$  determina un elevato disagio per il passeggero e sollecitazioni sul sistema. Questo è uno dei motivi per mettere i motori in massa doppiamente sospesa.

Il comportamento del sistema diventa non lineare quando la velocità aumenta. Inoltre, il discomfort influisce



(Fonte - Source: [3])

Figura 5 – Disagio da sospensione ferroviaria, accelerazione verticale (deviazione standard).

Figure 5 – Railway suspension discomfort (standard deviation of the vertical acceleration).

### 2.3. Weight effect on the power spectral density

A parameter sensitivity analysis about railway suspension system is performed and found in literature [3].

The strategy of this analysis is to modify one parameter while the others stay fixed. The modification of parameter has made in comparison to reference values.

In the figure below (Fig. 4),  $m_1$  is one-fourth of the bogie mass and  $m_2$  is one-eighth of the body mass.

The displacement  $\xi$  (track irregularity) is assumed to be a random variable defined by a stationary and ergodic stochastic process. Two analytical formulae have been adopted to interpolate the measured data referring to the power spectral density (PSD) of the stochastic process defining  $\xi$ .

Therefore, the system is analyzed by using two approaches: one slope power spectral density (1S-PSD) and two slope power spectral density (2S-PSD).

The non-dimensional standard deviations derived from the two formulations are reported next.

They are estimated on the axle box.  $\sigma_{\ddot{z}_1}$  is the discomfort, namely the standard deviation of the vertical acceleration;  $\sigma_{Fz1}$  is the standard deviation of the vertical force on the axle box.

In this article we are interested in the analysis about the bogie frame mass.

The following figure (Fig.5) shows the behaviour of the system when the once-sprung mass is modified in comparison with a reference value of weight ( $m_{r1}$ ). The higher is the speed, the higher will be the effect of the bogie frame mass and component fixed on it.

Large mass ratio  $m_1/m_{r1}$  determines high discomfort for the passenger and stresses on the system. This is one of the reasons to put motors in doubled sprung mass.

The system behaviour becomes nonlinear when the speed increases. Moreover the discomfort has also effect on the ride quality and running characteristics.

The contribution and stochastic disturbance due to the track has got a large effect on the behaviour of the dynamics. For instance, the 1S-PSD does not depend from the speed and the variation of the discomfort  $\sigma_{\ddot{z}_1}$  is negligible in comparison with the 2S-PSD behaviour.

From the first graph it is possible to understand the heavy influence of the track irregularities on the system.

The next diagram shows the effect of the mass modification focused on the vertical force acting on the axle box.

This performance, namely the standard deviation of the vertical force has got a direct effect on the derailment and the other phenomena in the wheel-rail contact.

The rail holding affects the Y/Q ratio, the ride quality and the running performance.

The graph (Fig. 6) shows that the mass ratio  $m_1/m_{r1}$  has got a huge effect on the vertical forces acting in the axle box.

sce anche sulla qualità di marcia e sulle caratteristiche di marcia.

Il contributo e il disturbo stocastico dovuto al binario ha avuto un grande effetto sul comportamento della dinamica. Ad esempio, il 1S-PSD non dipende dalla velocità e la variazione del discomfort  $\sigma_{z1}^*$  è trascurabile in confronto con il comportamento a 2S-PSD.

Dal primo grafico è possibile comprendere la pesante influenza delle irregolarità del binario sul sistema. Il diagramma successivo mostra l'effetto della modifica della massa focalizzata sulla forza verticale che agisce sulla boccia. Questa prestazione, cioè la deviazione standard della forza verticale, ha un effetto diretto sul deragliamento e sugli altri fenomeni nel contatto ruota-rotaia.

La variazione della forza verticale della rotaia influisce sul rapporto Y/Q, sul comfort e sulle prestazioni di marcia. Il grafico (Fig. 6) mostra che il rapporto di massa  $m_1/m_{r1}$  ha un effetto enorme sulle forze verticali che agiscono nella boccia. Il comportamento di  $\sigma_{Fz1}$  è lineare con  $m_1/m_{r1}$  dopo una soglia. Infine, lo studio dell'analisi di sensibilità si conclude con la deviazione standard della sospensione secondaria (Fig. 7):  $\sigma_{z1-z2}$  non è influenzata da  $m_1/m_{r1}$ . Pertanto, la massa del telaio del carrello non ha un grande effetto sulla sagoma del veicolo in direzione verticale.

#### 2.4. Requisiti strutturali dei telai dei carrelli

Le norme EN sono fondamentali per sviluppare un progetto corretto dello specifico componente secondo i re-

*The behaviour of  $\sigma_{Fz1}$  is linear with  $m_1/m_{r1}$  after a threshold.*

*Finally, the study of the sensitivity analysis is concluded with the standard deviation of the secondary stroke (Fig. 7)  $\sigma_{z1-z2}$  is not affected by the  $m_1/m_{r1}$ .*

*Therefore, the bogie frame mass has not large effect on the vehicle gauge in vertical direction.*

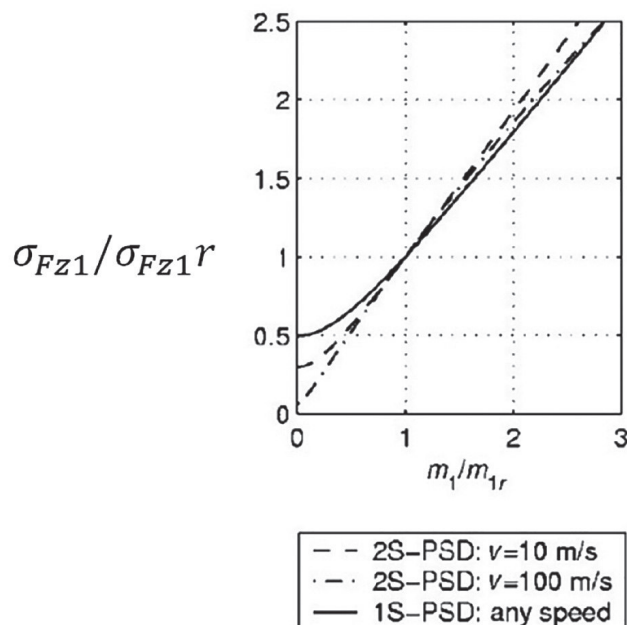
#### 2.4. Structural requirements of the bogie frames

*The EN regulations are crucial in order to perform EN regulations to perform a correct project of the specific component according to the requirements of the national and TSI rules. The V&V team (Validation and Verification) use the appropriate sections of the ENs (tests and calculations) to assure that the project passes the parameters of those specific rules.*

*There are also Notified bodies and Designed bodies must match the EN regulations parameters with the results of the testing laboratories and V&V team in order to perform their EC validation procedure and certification. Indeed, the Notified bodies and Designed bodies should confirm their independent judgement of compliance of the component with reference to the parameters of the EN and national and TSI rule.*

*The EN standard [5] states the method of specifying the structural requirements of bogie frames.*

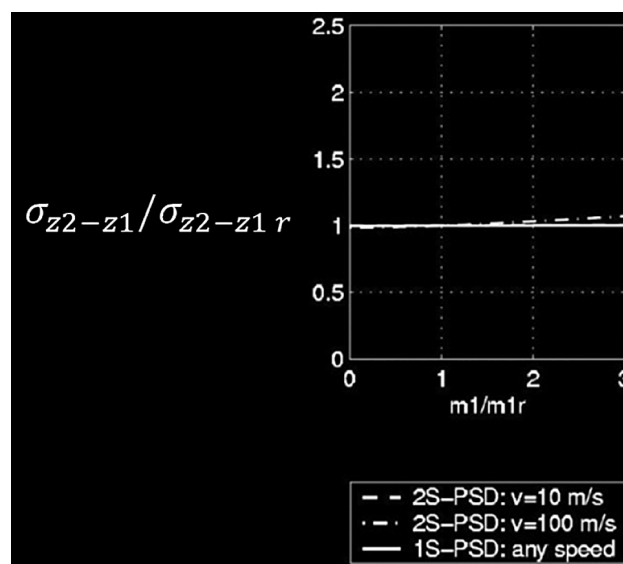
*The code defines the bogie frame like a load-bearing structure generally located between primary and secondary suspension.*



(Fonte - Source: [3])

Figura 6 – Forza verticale delle sospensioni ferroviarie (deviazione standard).

Figure 6 – Railway suspension vertical force (standard deviation of the vertical force).



(Fonte - Source: [3])

Figura 7 – Sospensione secondaria ferroviaria, spostamento verticale (deviazione standard).

Figure 7 – Railway secondary stroke (standard deviation of the vertical displacement).



quisiti delle norme nazionali e delle STI. Il gruppo V&V (Validazione e Verifica) utilizza le apposite sezioni delle EN (test e calcoli) per assicurare che il progetto rispetti i valori relativi ai parametri di quelle specifiche norme.

Ci sono anche gli organismi notificati e gli organismi designati siano in accordo con i parametri della normativa EN con i risultati dei laboratori di prova e del gruppo di V&V, al fine di eseguire la loro procedura di convalida e certificazione CE. Infatti, gli organismi notificati e gli organismi designati dovrebbero confermare il loro giudizio indipendente di conformità del componente con riferimento ai parametri della norma EN, nazionale e della STI.

La norma EN [5] stabilisce il metodo per specificare i requisiti strutturali dei telai dei carrelli. La norma definisce il telaio del carrello come una struttura portante generalmente situata tra la sospensione primaria e quella secondaria. La stessa norma EN [5] stabilisce la classificazione del carrello in base ai requisiti operativi. Queste specifiche derivano dai casi di sollecitazione, di carichi eccezionali, di sollecitazioni a fatica del progetto e dal tipo di veicolo.

Vi sono sette categorie di carrelli appartenenti alla categoria B-I fino alla categoria B-VII. Si notino i seguenti valori di accelerazione che fluiscono attraverso il telaio del carrello dopo (Tab. 2) e prima (Tab. 3) del primo stadio di sospensione ( $g$  = accelerazione di gravità, valore standard).

È stato stimato che le accelerazioni possono raggiungere valori di 100 g nel contatto ruota-rotaia a causa di difetti e irregolarità della rotaia. La conseguenza di tali accelerazioni deve essere sopportata dal telaio del carrello: pertanto la sua progettazione è fondamentale per lo sviluppo di un veicolo ottimale. In generale il telaio del carrello è fuso o assemblato. I telai dei carrelli sono fabbricati in base alle loro condizioni di esercizio. Un interessante confronto tra i due processi produttivi è riportato in [9]. Da tale documento risulta che il carrello "fuso" è più pesante del carrello assemblato, le probabilità di difetti nella colata sono maggiori, i difetti (porosità, restringimento, particelle di inclusione, segregazione degli elementi di lega) sono difficili da recuperare e la preparazione della colata è un processo che richiede tempo. Il punto di vista degli autori in [9] è che il carrello assemblato è migliore del telaio del carrello "fuso". Ovviamente nel caso di telaio del carrello assemblato è necessario che gli operatori professionali eseguano il processo industriale della saldatura.

*The same EN standard [5] states the classification of the bogie according the operating requirements. These specifications come from the load cases, exceptional loads, fatigue loads of the project and vehicle type.*

*There are 7 categories of bogie from category B-I to category B-VII. It is noticeable that following values of acceleration through the frame bogie after (Tab. 2) and before (Tab. 3) the first suspension stage:*

*It has been estimated that the accelerations can reach values of 100 g in the wheel-rail contact due to defects and rail irregularities.*

*The consequence of that accelerations must be withstood by the bogie frame, therefore its design is crucial to design an optimal vehicle.*

*In general the bogie frame is either casted or fabricated. The bogie frames are manufactured based on their working conditions. An interesting comparison between the two manufacturing processes is reported in the [9].*

*What stand out from the paper [9] is that the casting bogie is heavier than the fabricated bogie, the chances of defects in the casting is higher, the defects (porosity, shrinkage, inclusion particles, segregation of alloying elements) are difficult to recover and the preparation of casting is a time taking process.*

*The point of view of the authors in [9] is that fabricated bogie is much better to casting bogie frame.*

Tabella 2 – Table 2

Accelerazioni di progetto per le apparecchiature fissate al telaio del carrello  
*Design accelerations for equipment attached to the bogie frame*

Direzione <i>Direction</i>	Accelerazione eccezionale <i>Exceptional Acceleration</i>	Accelerazione a fatica <i>Fatigue Acceleration</i>
Verticale <i>Vertical</i>	$\pm 20g$	$\pm 6g$
Laterale <i>Lateral</i>	$\pm 10g$	$\pm 5g$
Longitudinale <i>Longitudinal</i>	$\pm 3g$ o $\pm 5g$	$\pm 2,5g$

Tabella 3 – Table 3

Accelerazioni di progetto per le apparecchiature collegate alla bocca  
*Design accelerations for equipment attached to the axle box*

Direzione <i>Direction</i>	Accelerazione eccezionale <i>Exceptional Acceleration</i>	Accelerazione a fatica <i>Fatigue Acceleration</i>
Verticale <i>Vertical</i>	$\pm 70g$	$\pm 25g$
Laterale <i>Lateral</i>	$\pm 10g$	$\pm 5g$
Longitudinale <i>Longitudinal</i>	$\pm 10g$	$\pm 5g$

L'autore dell'articolo [10] afferma che occorre anche considerare della sequenza di saldatura e del processo di tecnologico di distensione al fine di ottenere una struttura del materiale stabilizzata. A tale scopo è stata redatta la norma EN per regolamentare la saldatura in campo ferroviario [6].

Le seguenti ipotesi cercano di riassumere le linee guida per il progetto del telaio del carrello. Il telaio del carrello dovrebbe essere realizzato in acciaio al carbonio con alta resistenza a trazione e resistenza agli agenti atmosferici, in grado di sopportare carichi pesanti, con un design che incorpori adeguati margini di sicurezza.

Si richiede inoltre che la costruzione del telaio del carrello sia coerente con una buona progettazione meccanica e sia il più leggero possibile. È consentito l'uso di inserti in acciaio fuso o ghisa di tipo accettabile nella fabbricazione del carrello, ad esempio paracolpi e boccole.

Il telaio dovrebbe seguire un design semplice che richieda un minimo di lavorazione e tutti i punti di collegamento del telaio dovrebbero essere facilmente accessibili ai fini di ispezione e manutenzione. Il telaio del carrello deve essere adeguatamente protetto contro la corrosione e adeguatamente verniciato. La composizione e le proprietà fisiche e meccaniche dell'acciaio devono essere pienamente documentate nel fascicolo tecnico del materiale rotabile. Il telaio del carrello dovrebbe essere fabbricato con una struttura in acciaio costituita da lamiere laminate a freddo o a caldo e da parti forgiate e fuse costituite da G20Mn5+QT [10]. La progettazione strutturale deve essere orientata per ridurre qualsiasi concentrazione di stress meccanico. Se possibile, devono essere intraprese azioni appropriate per rimuovere la sollecitazione di saldatura del telaio del carrello.

### 3. Materiali tradizionali

I materiali tradizionali utilizzati per la produzione di telai per carrelli sono gli acciai strutturali, in particolare gli acciai basso-legati ad alta resistenza con specifiche nomenclature di acciaio strutturale dello standard europeo. Lo stesso materiale viene solitamente utilizzato per le due parti principali del telaio del carrello (Fig. 8), vale a dire le travi laterali e le traverse. La sezione trasversale delle due parti potrebbe essere diversa: lamiere spesse laminate a caldo e tubi in acciaio.

L'applicazione delle classi di acciaio tradizionali è un approccio ben noto, perché questi materiali derivano da una lunga storia di progettazione dei carrelli. Altre applicazioni tipiche delle lamiere in acciaio strutturale sono:

- carpenterie strutturali, ponti/componenti altro punto offshore; centrali;
- attrezzature per l'estrazione e il movimento terra;
- componenti della torre eolica.

La lunga esperienza e conoscenza dei materiali tradizionali ha permesso di scrivere le norme EN [4] su questi ma-

*Obviously in case of fabricated bogie frame it needs that professional workers must perform the manufacturing process of welding.*

*The author of article [10] states, that it also needs to take into account the welding sequence and the stress relief annealing in order to obtain a stabilized structure.*

*For this specific purpose, the EN standard was written to regulate the welding in railways field [6].*

*The following assumptions try to summarize the guidelines for the bogie frame project.*

*The bogie frame shall be manufactured from weather-resistant high tensile carbon steel, capable of withstanding heavy duty, with the design incorporating adequate safety margins.*

*It is also required that the bogie frame construction shall be consistent with good mechanical design and shall be as light as possible. The use of cast steel or cast iron inserts of acceptable grade in fabrication of the bogie is permissible, for instance bumpstops and axle box.*

*The frame should follow a simple design requiring a minimum of machining and all frame attachment points should be readily accessible for inspection and maintenance purposes.*

*The bogie frame must be suitably protected against corrosion and adequately painted. The composition and physical and mechanical properties of the steel have to be fully documented in the technical file of the rolling stock.*

*The bogie frame shall be fabricated of steel construction made of cold or hot rolled plates and forged and cast parts which are made of G20Mn5+QT [10]. Structural design should be oriented to reduce any stress concentration. If it is possible, appropriate actions shall be taken to remove welding stress of bogie frame.*

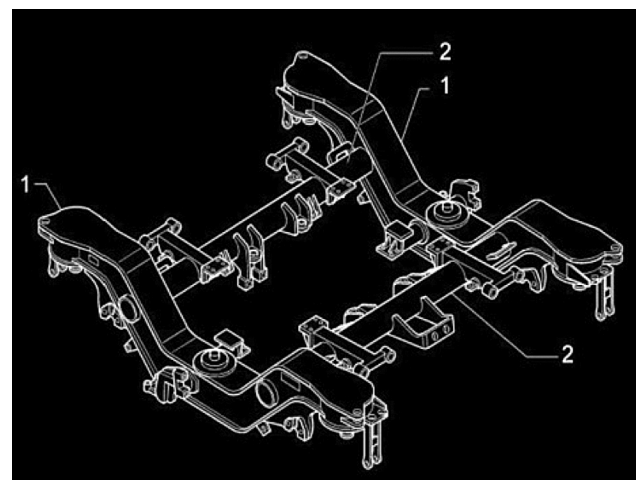
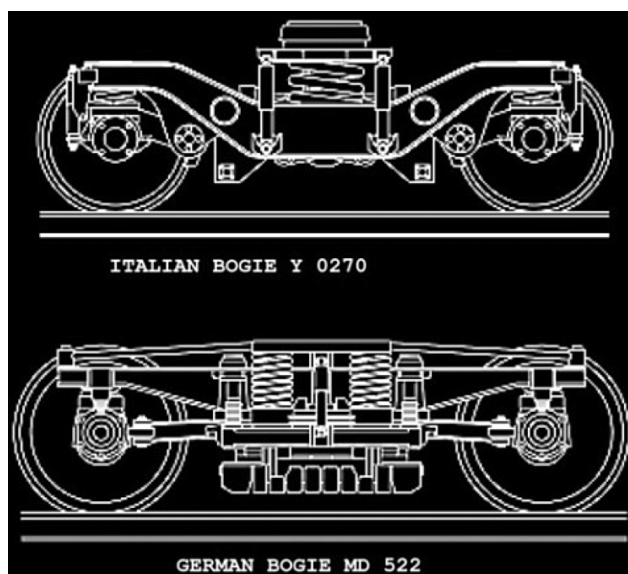


Figura 8 – Parti del telaio del carrello: 1) travi laterali; 2) traverse.

Figure 8 – Bogie frame parts: 1) side beams; 2) cross beams.



(Fonte - Source: Testo [1])

Figura 9 – Famiglie europee di carrelli.  
Figure 9 – European families of bogies.

teriali e sull'applicazione in ambito ferroviario. I materiali descritti in seguito furono scelti nella fabbricazione dei carrelli principali europei per tre generazioni. Nel secolo scorso le tre serie europee di carrelli (Fig. 9) erano composte dal carrello tedesco (MindenDeutz), dal carrello francese e dal carrello italiano (Fiat), come mostrato nel [1]. Oggi, i design dei carrelli derivano tutti da questi prototipi, prendendo gli aspetti positivi di ognuno dei progetti europei.

Sono passate tre generazioni utilizzando i materiali tradizionali:

- prima generazione, velocità massima 160 km/h e 14-16 t di carico assiale;
- seconda generazione, velocità massima 200 km/h e 14-16 t di carico assiale;
- terza generazione, velocità massima 250 km/h e 11-12 t di carico assiale.

Il carrello Y32 è stato utilizzato in Francia per la seconda generazione di carrelli per carrozze passeggeri. Il materiale scelto per la fabbricazione è stato l'S355J2+N. La topologia del carrello era la struttura di saldatura del tipo a telaio H. La trave del telaio laterale è di tipo U.

Il carrello Y0270 è stato utilizzato in Italia per la prima generazione di carrelli per carrozze passeggeri. Il materiale scelto per la produzione è stato l'S235. Il materiale scelto nella seconda generazione è diventato l'S355J2G3 per il carrello italiano pari a S355J2+N carrelli francesi.

La famiglia tedesca di carrelli ha utilizzato la St 52-3 (MindenDeutz) che è stata utilizzata per le carrozze passeggeri per i treni IC.

### 3. Traditional materials

The traditional materials used for the bogie frame manufacturing are the structural steels, in particular high strength low alloy with specific European standard structural steel grades.

The same material is usually used for the two main parts of the bogie frame (Fig. 8), namely side beams and cross beams. The cross section of the two parts could be different: hot rolled thick plates and steel tubes.

The application of the traditional steel grades is a well-known approach, because these materials had collected a long history of bogie design. Other typical applications of the structural steel plates are:

- Structural steelworks, bridge/offshore components
- Power plants;
- Mining and earth moving equipment;
- Load handling equipment;
- Wind tower components.

The long experience and knowledge of the traditional materials has allowed to write the EN standards [4] about these materials and the application on the railways field.

The materials described next were chosen in the manufacturing of the European principal bogies for three generations.

In the past century three European bogie families (Fig. 9) were the German bogie (MindenDeutz), the French bogie and the Italian bogie (Fiat), like showed in the [1]. Today, the bogie designs come out all from those concepts, by taking the positive aspects of each European bogie design.

Three generations have been passed by using the traditional materials:

- First generation, maximum speed 160 km/h and 14-16 t of axial load;
- Second generation, maximum speed 200 km/h and 14-16 t of axial load;
- Third generation, maximum speed 250 km/h and 11-12 t of axial load.

The Y32 bogie was used in France for the second generation of bogies for passenger coaches. The material chosen for the manufacturing was the S355J2+N.

The topology of the bogie was H frame type welding structure. The side frame beam is U type structure.

The Y0270 bogie was used in Italy for the first generation of bogies for passenger coaches. The material chosen for the manufacturing was the S235. The material chosen in the second generation became the S355J2G3 for the Italian bogie equals to S355J2+Nof French bogies.

The German family of bogie used the St 52-3 (MindenDeutz) that was used for the passenger coaches for IC trains.

The last example of bogie frame for traditional materials is the DT200 bogie frame of the Japan Shinkansen bogie.

Tabella 4 – Table 4

Simboli di designazione di S355  
*Designation symbols of S355*

Simbolo <i>Symbol</i>	Significato del simbolo <i>Symbol Meaning</i>
S	Strutturale <i>Structural</i>
355	Tensione di snervamento minimo 355 MPa fino a 16 mm <i>355 MPa minimum yield strength up to 16 mm</i>
JR	Charpy intaglio a V (longitudinale) 27 J @ +20 gradi Celsius <i>355 MPa minimum yield strength up to 16 mm</i>
JO	Charpy intaglio a V (longitudinale) 27 J @ 0 gradi Celsius <i>Charpy V-notch (Longitudinal) 27 J @ 0 Celsius degree</i>
J2	Charpy intaglio a V (longitudinale) 27 J @ -20 gradi Celsius <i>Charpy V-notch (Longitudinal) 27 J @ -20 Celsius degree</i>
K2	Charpy intaglio a V (longitudinale) 40 J @ +20 gradi Celsius <i>Charpy V-notch (Longitudinal) 40 J @ +20 Celsius degree</i>
+N (o G3) +N (or G3)	Condizione di fornitura "Normalizzato o Normalizzato laminato" <i>Supply condition "Normalized or Normalized Rolled"</i>
N	Impatti longitudinali Charpy con intaglio a V a una temperatura non inferiore a -20 gradi Celsius <i>Longitudinal Charpy V-notch impacts at a temperature not lower than minus 20 Celsius degree</i>
W	Migliore Resistenza alla Corrosione Atmosferica <i>Improved Atmospheric Corrosion Resistance</i>

L'ultimo esempio di telaio del carrello per materiali tradizionali è il telaio del carrello DT200 dello Shinkansen giapponese. La topologia era di tipo H. Gli ingegneri giapponesi hanno utilizzato come materiali principali le piastre in acciaio SS400 e SM400B con uno spessore di 9 mm e una buona saldabilità.

Poi per i prossimi treni Shinkansen, gli ingegneri decidero di costruire le travi del telaio utilizzando lamiere spesse di acciaio laminato SM490YA e STKM18B.

Dagli scenari precedenti, comprendiamo che il telaio è tipicamente realizzato in lamiere di acciaio S355 laminate a caldo, anche recentemente. Tuttavia, nella trattazione seguente si analizza la classe di acciaio (Tab. 4).

Dopo aver mostrato il significato dei simboli della designazione dell'acciaio (cfr. Tab. 4), è possibile identificare il tipo di acciaio (Tab. 5) utilizzati per i suddetti telai di carrelli europei.

La densità di quel materiale è di 7850 Kg/. La composizione chimica dell'acciaio scelto è riportata nella tabella seguente (Tab. 6). Si considerano i valori per uno spessore inferiore a 40 mm.

Vale la pena notare la percentuale massima di Manganese, Silicio e Rame all'interno del materiale. Le piccole percentuali di Zolfo e Fosforo sono le impurità accettate nel materiale. Nella Tab. 7 vengono raccolte le principali caratteristiche meccaniche, che saranno utili nell'ulteriore discussione, in questo documento, per confrontare il materiale tradizionale con i materiali innovativi. La di-

*The topology was H type. Japan engineers used as principal materials the SS400 and SM400B steel plates with a thickness of 9 mm and good welding capability.*

*Then for the next Shinkansen trains, engineers decided to build the frame beams by using SM490YA and STKM18B thick rolled steel plates.*

*From the previous scenarios, we understand that the frame is typically made of S355 steel hot rolled sheets, also recently. However in the next tables and paragraphs we analyze the steel grade.*

Tabella 5 – Table 5

Corrispondenza della qualità dei tipi S355  
*Correspondence of quality of S355 grades*

Tipi di acciaio <i>Steel grades</i>	Italia <i>Italy</i>	Germania <i>Germany</i>
S355J2G3	Fe 510 D1	St 52-3 N

Tabella 6 – Table 6

Composizione dei tipi S355, percentuali massime di elementi  
*Composition of S355 grades, maximum percentages of elements*

C %	Mn %	P %	S %	Si %	Cu %
0,2	1,6	0,025	0,025	0,5	0,55



Tabella 7 – Table 7

Caratteristiche meccaniche di S355J2+N @ < 16 mm di spessore  
 Mechanical characteristics of S355J2+N @ < 16 mm of thickness

Quantità fisica Physical quantity	Valori Values
Tensione di snervamento minimo Reh Reh minimum yield strength	355MPa
Energia min. assorbita @ -20°C Min. Absorbed Energy @ -20°C	27 J
Percentuale di allungamento dopo rottura Elongation percentage after fracture	22%
Resistenza alla trazione Tensile strength	490-630 MPa
HB (durezza Brinell) HB (Brinell hardness)	141-192
E (Modulo di Young) E (Young's Modulus)	210 GPa @ 20°C
G (Modulo tangenziale) G (Tangential Modulus)	80 GPa @ 20°C
Resistenza alla rottura della KIC [11] KIC fracture toughness [11]	35,78 - 40,4 MPa√m

scussione sul materiale tradizionale si conclude con la seguente considerazione sulle saldature e sull'effetto della saldatura sul materiale.

La Fig. 10 è estratta da [7] ed è possibile osservare il cambiamento delle proprietà meccaniche dovuto alla saldatura.

La discontinuità del materiale dovuta alle saldature potrebbe causare una concentrazione di sollecitazioni attorno al cordone di saldatura. Inoltre, le istruzioni di manutenzione devono essere chiare circa l'ispezione all'ispezione del telaio del carrello, soprattutto nella zona intorno alle saldature. Altri possibili danneggiamenti al telaio del carrello sono dovuti a deformazioni, corrosione, crepe e graffi dovuti al sollevamento della massicciata. Si potrebbero scegliere tipi di acciaio migliori, ma il costo elevato delle leghe potrebbe non essere giustificato. In [10], si suppone l'uso di piastre di acciaio ad alta resistenza con una sollecitazione di snervamento nell'intervallo di 355-500 MPa. Tuttavia, al giorno d'oggi, molti telai di carrelli sono costruiti ancora con l'acciaio S355J2, soprattutto macchine da lavoro su rotaia o treni regionali; quindi, si ritroverà in utilizzo quel materiale per molti anni. Inoltre, la forma ad H è anche la forma prevalente: infatti permette di ottimizzare la struttura e la capacità di carico.

#### 4. Materiali innovativi

Recentemente, sono stati valutati nuovi materiali per

After to show the meaning symbols of the steel designation (Tab. 4), it is possible to identify the steel grade (Tab. 5) used for the aforementioned European bogie frames.

The density of that material is 7850 Kg/. The chemical composition of the chosen steel is reported in the next table (Tab. 6). The values for a thickness less than 40 mm are considered.

It is worth noticing the maximum percentage of Manganese, Silicon and Copper inside the material. The little percentages of Sulfur and Phosphorus are the impurities accepted in the material.

In the next table (Table. 7) the main mechanical characteristics are collected. In the further discussion in this paper, they will be useful to compare traditional material with novel materials. The discussion about traditional material is concluded by the following consideration about welds and the effect of welding on the material.

The next table (Tab. 10) is extracted by the [7] and it is possible to look at the mechanical properties change due to welding.

The discontinuity of the material due to the welds could cause stress concentration around the welding seam.

Moreover, the maintenance instruction must be clear about the inspection of the bogie frame, above all in the area around welds.

Other possible damages on the bogie frame are due to deformations, corrosion, cracks and scratches due to ballast lifting.

Better steel grades could be chosen, but the high cost of alloys may be not justified.

In [10], it is guessed the use of high strength steel plates with a yield in the range of 355-500 MPa. However, nowadays many bogie frames are built yet with the S355J2 steel, above all on-track machines either regional trains; thus we will look at that material for many years. Moreover the H shape is also the prevailing shape, indeed it allows to optimize the structure and load capability.

#### 4. Innovative materials

Recently, novel material has assessed to design new bogie frames. Basically, the engineers have focused on cast iron and composites.

	Limit stress N/mm <sup>2</sup>		
	S235	S275	S355
Parent metal	235	275	355
Parent metal in the immediate vicinity of welds	214	250	323

Figura 10 – Effetto della saldatura sulla proprietà del materiale [7].

Figure 10 – Effect of welding on material property [7].

progettare il telaio del carrello. Gli ingegneri si sono concentrati fondamentalmente su ghisa e compositi.

In [12] viene presentato un lavoro molto interessante; l'argomento principale della ricerca è il ghisa duttile austemperata (ADI). Le fusioni sono abbastanza competitive in una produzione su larga scala e l'applicazione della ghisa potrebbe migliorare la qualità della fusione in termini di difetti; il problema della riparazione in servizio mediante saldatura non può essere risolto. Soprattutto in caso di saldature tra ghisa e acciaio; pertanto, sono necessari collegamenti a vite.

In [12], l'autore ha esposto un nuovo design del telaio del carrello utilizzando l'ADI per i carri merci. I risultati meccanici sono buoni ma c'è il problema dell'equalizzazione disomogenea dei carichi delle ruote e della flessibilità strutturale. A causa delle difficoltà di applicazione di questo materiale per la struttura completa del telaio del carrello, ci sono molti casi di componenti specifici che sono realizzati con questo materiale e poi sono fissati al telaio del carrello.

L'approccio graduale di applicare il nuovo materiale solo in piccoli elementi è utile per studiare il comportamento del nuovo materiale, soprattutto per la durata a fatica. Tutte le nuove applicazioni della ghisa nella componente ferroviaria sono riportate in [12]; qui si ricorda la boccola ADI fusa, la ruota, l'accoppiatore da traino pesante.

È utile riportare le caratteristiche (Tab. 8) meccaniche di uno di questi materiali riportati in [12]. La densità di quel materiale è di 7100 kg/m<sup>3</sup>. La Tab. 9 riporta la composizione chimica della ghisa scelta. La designazione dell'ADI 800 è armonizzata nel EN-GJS-800-10 (Tab. 10). Questo tipo di materiale è una ghisa sferoidale, trattata

Tabella 9 – Table 9

Composizione dell'ADI 800, percentuali massime di elementi  
*Composition of ADI 800, maximum percentages of elements*

C %	Si %	Mn %	Ni %
3,5 - 3,7	2,3 - 2,6	0,4	1

Tabella 10 – Table 10

Simboli di designazione di EN-GJS-800-10  
*Designation symbols of EN-GJS-800-10*

Simbolo Symbol	Significato Meaning
EN	Norma europea European norm
GJS	Ghisa sferoidale Spheroidal cast iron
800	Resistenza alla rottura minima in Mpa Minimum tensile strength in MPa
10	Allungamento in percentuale Elongation in percentage

Tabella 8 – Table 8

Caratteristiche meccaniche dell'ADI 800  
*Mechanical characteristics of ADI 800*

Quantità fisica Physical quantity	Valori Values
Tensione di snervamento minimo Reh <i>Reh minimum yield strength</i>	500 MPa
Energia min. assorbita @ +23°C <i>Min. Absorbed Energy @ +23°C</i>	10 J
Percentuale di allungamento dopo rottura <i>Elongation percentage after fracture</i>	10%
Resistenza alla trazione <i>Tensile strength</i>	800 MPa
HB (durezza Brinell) <i>HB (Brinell hardness)</i>	HB 250-310
E (Modulo di Young) <i>E (Young's Modulus)</i>	170 GPa @ 20°C
G (Modulo tangenziale) <i>G (Tangential Modulus)</i>	60 GPa @ 20°C
Resistenza alla rottura della KIC [8], [11] <i>KIC fracture toughness [8], [11]</i>	80-106 MPa√m

A very interesting work is reported in [12]; the main topic of the research is the Austempered Ductile Iron (ADI).

Castings are quite competitive in a large-scale production and the application of cast iron could improve the casting quality in terms of defects; the problem of in-service repair by welding cannot be solved. Above all in case of welds between cast iron and steel; therefore, bolts connections are required.

In [12], the author has exposed a new design of bogie frame by using ADI for freight wagon. The mechanical results are good but there is the problem of uneven equalization of the wheel loads and the structural flexibility.

Due to the difficulties to apply this material for the complete structure of the bogie frame, there are many cases of specific components that are made with this material and then are fixed to the bogie frame.

The gradual approach to apply the novel material only in small pieces is useful to study the behaviour of the new material, above all for the fatigue life.

All the new applications of the cast iron in the railway component are reported in [12]; here we recall the Casted ADI axlebox, wheel, heavy haul coupler.

It is useful to report the table of characteristics (Tab. 8), related to the mechanical characteristics of one of this material reported in [12]. The density of that material is 7100 kg/m<sup>3</sup>.

The chemical composition of the chosen cast iron is reported in the next table (Tab. 9). The designation of the ADI

mediante austenitizzazione. Il materiale è classificato come un'alternativa per l'acciaio strutturale ed equivale a un acciaio temperato in termini di prestazioni.

Alcuni ingegneri hanno compiuto un ulteriore avanzamento nel tentativo di ottenere un telaio del carrello più leggero. Ci sono esempi di telai di carrelli compositi [13], per la metropolitana/tram in paesi stranieri. Ovviamente, le applicazioni sono relative ai compositi con fibre di vetro e fibre di carbonio con matrice plastica. Infatti, le fibre di Kevlar e Boro sono costose e vengono utilizzate in applicazioni militari e aerospaziali. Inoltre, il loro comportamento è fortemente anisotropo.

Le matrici ceramiche sono troppo fragili per i componenti strutturali primari; le matrici metalliche sono costose e vengono utilizzate in altre applicazioni.

In [13], è stato studiato un telaio del carrello in polimero rinforzato con fibra di vetro GFRP per treno metropolitano urbano ed effettuato un confronto con l'SM490A, vale a dire l'S355JR.

Vi è un esempio di produzione di telai di carrelli utilizzando il composito in fibra di carbonio. Questo progetto ha vinto il Premio Compositi JEC 2018 a Parigi. I partner di questo progetto innovativo sono Magma Structures (UK), ELG Carbon Fiber Ltd (UK), Alstom Transport (UK), University of Birmingham (UK) e University of Huddersfield (UK). Anche in Giappone, Kawasaki ha studiato l'applicazione dei compositi in fibra di carbonio in un carrello di nuova generazione per materiale rotabile "efWING" (Fig. 11). Un documento sull'applicazione del polimero rinforzato con fibra di carbonio è riportato in

800 is harmonized in EN-GJS-800-10 (Tab. 10). This type of material is a spheroidal cast iron, treated by austempering. It is classified like an alternative for structural steel and it equated to a tempered steel in terms of performance.

Some engineers have performed a further step in the attempt to get lighter bogie frame. There are examples of composite bogie frames [13], for metro/tram transports in foreign countries.

Obviously, the applications are related to the glass and carbon fibers composites with plastic matrix.

Indeed, the Kevlar and Boron fibers are expensive and are used in military and aerospace applications. Moreover their behaviour is very anisotropic.

The ceramic matrices are too much fragile for the primary structural components; the metal matrices are expensive and are used in other applications.

In the [13], GFRP a Glass Fiber Reinforced Polymer bogie frame for urban subway train has studied and a comparison is done with the SM490A, namely the S355JR.

There is an example of bogie frame manufacturing by using the Carbon fiber composite. This project has won the JEC 2018 Composites Awards in Paris.

The partners of this innovative project are Magma Structures (UK), ELG Carbon Fiber Ltd (UK), Alstom Transport (UK), University of Birmingham (UK) and University of Huddersfield (UK).

Also in Japan, Kawasaki has studied the application of the carbon fiber composites in the next-generation bogie for rolling stock "efWING" (Fig. 11). A paper about the application of the Carbon Fiber Reinforced Polymer is given in [14], but the project is virtual in ANSYS.

As done for the traditional material, we report the table to gather the mechanical performances of the GFRP composite. We consider the case of quasi-isotropic glass-epoxy laminate with 60% of E-Glass fibers.

The density of the material is 2100 Kg/. The other properties are in the appropriate table (Tab. 11).

We report the table [Table 12] to gather the mechanical performances of the CFRP (Carbon fiber reinforced polymer) composite. We consider the case of quasi-isotropic carbon-epoxy laminate with 60% of carbon fibers.

The density of the material is 1700 Kg/. The other properties are in the appropriate table. The GFRP and CFRP quasi-isotropic laminate has a stiffness matrix that it does not depend on the



Figura 11 – Serie 6000 EMU gestita da Kumamoto Electric Railway Co, Ltd. [16].  
Figure 11 – Series 6000 EMU operated by Kumamoto Electric Railway Co., Ltd. [16].



[14], ma il progetto è allo stadio di prototipazione agli elementi finiti.

Come per il materiale tradizionale, riportiamo le prestazioni meccaniche del composito GFRP. Consideriamo il caso del laminato quasi-isotropo fibra vetro-epossidica quasi isotropo con il 60% di fibre di E-Glass. La densità del materiale è di 2100 Kg/m<sup>3</sup>. Le altre proprietà sono nella tabella appropriata (Tab. 11).

Riportiamo (Tab. 12) le prestazioni meccaniche del composito CFRP (*Carbon fiber reinforced polymer* - polimero rinforzato in fibra di carbonio). Consideriamo il caso laminato quasi-isotropo a fibra di carbonio-epossidica con il 60% di fibre di carbonio.

La densità del materiale è di 1700 Kg/m<sup>3</sup>. Le altre proprietà sono nella tabella correlata. Il materiale quasi-isotropo GFRP e CFRP ha una matrice di rigidità che non dipende dall'orientamento. I laminati quasi-isotropi tipici hanno le seguenti sequenze di strati in termini di angoli, con riferimento alla direzione principale di sviluppo del componente:

$$\left[ 0 \left| \frac{\pi}{n} \right| \frac{2\pi}{n} \right] \dots \left[ \frac{(n-1)\pi}{n} \right]_S$$

$$\left[ \frac{\pi}{n} \right| \frac{2\pi}{n} \right] \dots \left[ \pi \right]_S$$

Un esempio è il laminato [0; ± 45; 90]. L'Eurobogie [10] è stato il primo esempio di carrello composito su piccola scala (Fig. 12).

## 5. Analisi comparativa dei materiali

*I materiali tradizionali e i nuovi materiali, trattati nelle sezioni precedenti, vengono analizzati per ottenere un utile confronto tra i parametri meccanici chiave. Inoltre, vengono eseguite altre analisi riguardanti alcune diverse caratteristiche dei materiali in termini di proprietà, capacità e caratteristiche non strettamente meccaniche. Ovviamente il confronto inizia dal punto di vista meccanico. Fondamentalmente, si evidenziano i seguenti parametri (valorizzati nelle tabelle), relativi a un obiettivo specifico:*

- $\sigma_y$  o  $R_{eh}$  (tensione di snervamento) è rilevante per identificare l'intervallo di comportamento elastico lineare senza danni plastici.
- $E$  (modulo di Young) è fondamentale per valutare la rigidità del materiale. È vitale in caso di progettazione a rigidità rigido. Potrebbe avere un effetto enorme sulla ripartizione del carico negli assi della sa-

Tabella 11 – Table 11

Caratteristiche meccaniche del vetro epossidico quasi-isotropo

*Mechanical characteristics of the glass-epoxy quasi-isotropic*

Quantità fisica Physical quantity	Valori Values
Tensione di snervamento minimo $R_{eh}$ <i>Reh minimum yield strength</i>	600 MPa
$E$ (Modulo di Young) <i>E (Young's Modulus)</i>	22 GPa
Resistenza alla rottura della KIC <i>KIC fracture toughness</i>	20 - 60 MPa√m
Energia min. assorbita @ +25°C [15] <i>Min. Absorbed Energy @ +25°C [15]</i>	~ 10 J

Tabella 12 – Table 12

Caratteristiche meccaniche del vetro epossidico quasi-isotropo

*Mechanical characteristics of the glass-epoxy quasi-isotropic*

Quantità fisica Physical quantity	Valori Values
Tensione di snervamento minimo $R_{eh}$ <i>Reh minimum yield strength</i>	700 MPa
$E$ (Modulo di Young) <i>E (Young's Modulus)</i>	120 GPa
Resistenza alla rottura della KIC <i>KIC fracture toughness</i>	50 MPa√m
Energia min. assorbita @ +25°C [15] <i>Min. Absorbed Energy @ +25°C [15]</i>	~ 2 J

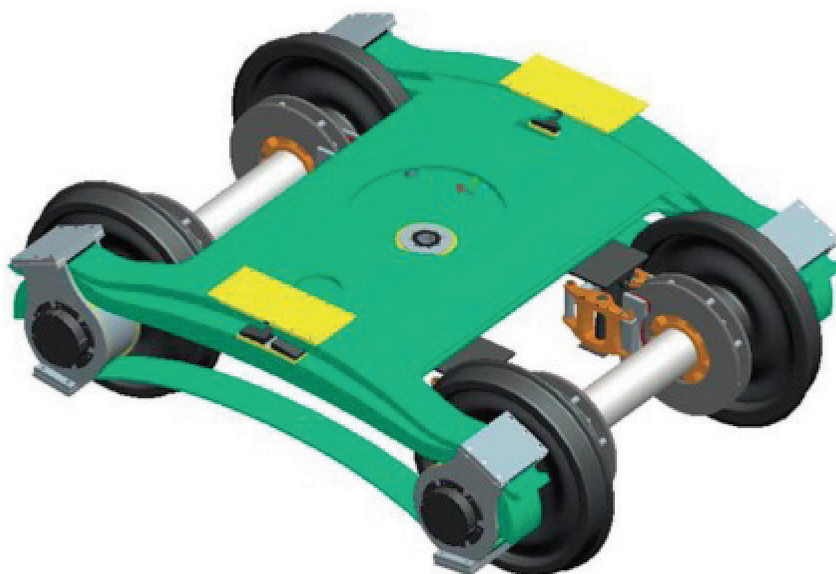


Figura 12 – Eurobogie.  
Figure 12 – Eurobogie.



la montata e del carrello. Una conseguenza diretta è la capacità di superare il difetto di sghebo sul binario.

- La KIC (resistenza alla frattura) è una misura della resistenza a frattura, del comportamento a fatica e della resistenza ai danni. Questo parametro è rilevante perché il materiale e il cordone di saldatura non sono perfetti, la cricca può essere sempre presente e intorno ai suoi apici ci sono concentrazioni di tensione che tendono ad aprire la fessura. Il materiale più resistente e tenace può anche sostenere un carico critico più elevato.
- L'energia min. assorbita è fondamentale per identificare la tenacia e la resilienza del materiale, soprattutto per l'impatto e il carico impulsivo delle parti meccaniche. Questo valore è importante perché nel capitolo precedente, l'autore ha dimostrato che ci sono accelerazioni di 70 g nel telaio del carrello a causa del contatto ruota-rotaia.

I primi due parametri dell'elenco vengono modificati per valutare correttamente l'efficienza strutturale dei materiali. In caso di confronto per strutture leggere, è necessario considerare il rapporto tra tali parametri e la densità del materiale. Pertanto, è meglio considerare la proprietà normalizzata con la densità del materiale piuttosto che la proprietà assoluta. Gli altri due parametri sono intrinseci e non dipendono dalla geometria e dalle dimensioni della telaio.

L'approccio della normalizzazione della densità è spiegato nei seguenti punti:

- $\sigma_y/\rho$  (resistenza allo snervamento specifica). Questo parametro per un materiale strutturale efficiente ha un valore alto. Ciò significa che la deformazione plastica si verifica a carichi elevati. Allo stesso tempo il peso e il volume del materiale per garantire questo comportamento sono bassi e quindi la quantità unitaria di materiale ha ottenuto migliori prestazioni rispetto al carico per resistere con la quantità minima di materiale in termini di volume e peso.
- $E/\rho$  (rigidezza specifica). Al contrario del settore aerospaziale, in campo ferroviario non è utile avere questo parametro con un valore estremamente elevato. Troppa rigidezza potrebbe portare problemi per l'esercizio del carrello da affrontare il difetto dello sghebo del binario. Tuttavia, una bassa rigidezza potrebbe influire sugli spostamenti relativi tra i componenti del carrello e dovrebbe essere presa in considerazione anche nei calcoli della sagoma (sagoma del veicolo).

È possibile effettuare un confronto tra il materiale tradizionale e il materiale nuovo. La Tab. 13 permette di rilevare gli aspetti positivi e negativi del materiale. Queste proprietà sono confermate nei grafici in [17].

Il materiale migliore per l'assorbimento minimo di energia è l'S355J2G3. È stimato mediante il test di Charpy (misura della resilienza e della tenacità all'impatto del materiale). In caso di incidente questa proprietà è fondamentale per ottenere la tenacità alla rottura e per assorbire

orientation. Typical quasi isotropic laminates have got the following ply-sequences in terms of angles with reference to the principal direction of the part:

$$\left[ 0 \left| \frac{\pi}{n} \right| \frac{2\pi}{n} \right] \dots \left[ \frac{(n-1)\pi}{n} \right]_s$$

$$\left[ \frac{\pi}{n} \left| \frac{2\pi}{n} \right| \dots \pi \right]_s$$

An example is the laminate  $[0; \pm 45; 90]$

In [10], the Eurobogie was the first example of composite bogie in a small scale (Fig. 12).

## 5. Comparative analysis of materials

The traditional materials and the novel materials of the previous sections are analyzed to get an useful comparison between the key mechanical parameters.

Moreover, other analysis are performed regarding some other characteristics of the materials in terms of properties, capabilities, not strictly mechanical characteristics.

Obviously the comparison is started from the mechanical point of view. Basically, the author has reported the following data in the tables, related to specific goal:

- $\sigma_y$  or  $R_{eh}$  (yield strength) is relevant to identify the range of linear elastic behaviour without plastic damage.
- $E$  (Young's modulus) is crucial to evaluate the stiffness of the material. It is vital in case of stiffness design. It could have a huge effect in the load sharing in the axles of the wheelset and the bogie. A direct consequence is the capability to overcome twist defect on the track.
- KIC (fracture toughness) is a measure of the crack resistance, fatigue behaviour and damage tolerant. This is relevant because the material and the weld seam are not perfect, the crack is always present and around its tips there are stress concentration to open the crack. The tougher material may also sustain a higher critical load.
- Min. Absorbed Energy is crucial to identify the tenacity and resiliency of the material, above all for impact and suddenly loading of the mechanical parts. This value is important because in the previous chapter, the author has showed that there are accelerations of 70 g in the bogie frame due to wheel-rail contact.

The first two parameters in the list above are modified to assess correctly the structural efficiency of the materials. In case of comparison for lightweight structures, it needs to consider the ratio between those parameters and the density of the material. Therefore, it is better to consider the density normalized property of the material rather than the absolute property.

The other two parameter are inherent and do not depend on the geometric and size of the body.

The approach of density normalization is explained in the following bullets:

Tabella 13 – Table 13

Confronto delle caratteristiche meccaniche tra materiale tradizionale e nuovo  
*Mechanical characteristics comparison between traditional and novel material*

Materiale Material	$\sigma_y/\rho$ [Mpa m <sup>3</sup> /Kg]	E/ $\rho$ [GPa m <sup>3</sup> /Kg]	KIC [MPa√m]	Energia Min. [J] Min. Energy [J]
S355J2G3	0,045	0,026	35,78 - 40,4	27
ADI800	0,07	0,024	80-106	10
GFRP	0,29	0,01	20 - 60	~ 10
CFRP	0,41	0,07	50	~ 2

re energia. Un altro caso è l'impatto contro la massicciata, per sollevamento aerodinamico indotto da elevate velocità di marcia del treno. L'ADI800 è il miglior materiale in termini di resistenza alla frattura. In caso di fessurazione, la ghisa duttile austemperata si oppone all'apertura, infatti la sollecitazione deve raggiungere il valore critico K per la crescita della cricca (Fig. 13).

Il materiale migliore per la rigidità specifica è l'S355J2G3. Il suo valore è quasi nella fascia media tra i materiali analizzati (Fig. 14). Pertanto, il telaio del carrello è abbastanza rigido da rimanere nella zona elastica quando affronta lo sghembo del binario. Il CFRP ha la massima resistenza specifica, dieci volte quella dell'S355J2G3 (Fig. 15). Questo materiale è fondamentale nel design leggero, ma a causa della bassa energia di assorbimento, si preferiscono i compositi Kevlar epossidici in caso di parti che devono resistere agli urti piuttosto che il CFRP. Un altro pro-

- $\sigma_y/\rho$  (specific yield strength). Structural efficient material has got high value of this parameter. This means that the plastic deformation occurs at high loads. At the same time the weight and volume of the material to assure this behaviour are low and therefore the unit quantity of material has got better performance against the load to withstand itself with the minimum quantity of material in terms of volume and weight.
- E/ $\rho$  (specific stiffness). On the contrary to the aerospace field, in the railway field it is not useful to have extremely high value of this parameter. Too much stiffness could bring problem about the running of the bogie to face with the twist track defect. However, low stiffness could affect the relative displacements among bogie components and should also be taken into account in gauge calculations (vehicle gauge).

The next table collects the traditional material and the novel material to get a clear comparison. The table (Tab. 13) allows to detect the positive and negative aspects of the materials. These properties are confirmed in the graphs in [17].

The best material for the minimum absorption of energy is the S355J2G3. It is estimated by means of the Charpy test, it is a measure of the resilience and impact toughness of the material.

In case of crash this property is crucial to get ductile rupture and to absorb energy. Another case is the impact against the ballast, due to the ballast lifting with the induced speed with the running of the train.

The ADI800 is the best material in terms of fracture toughness. In case of crack, the austempered ductile iron opposes to the opening, indeed the stress must reach the K critic value to crack growth (Fig. 13).

The best material for the specific stiffness is the S355J2G3. Its value is nearly in the middle range among the

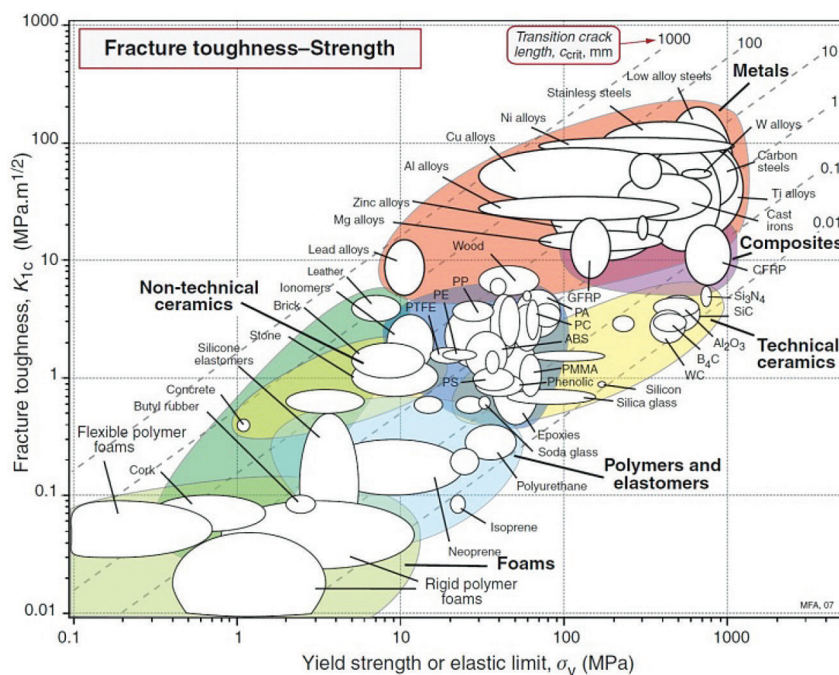


Figura 13 – Tensione di frattura rispetto alla resistenza allo snervamento [17].  
 Figure 13 – Fracture toughness VS yield strength [17].

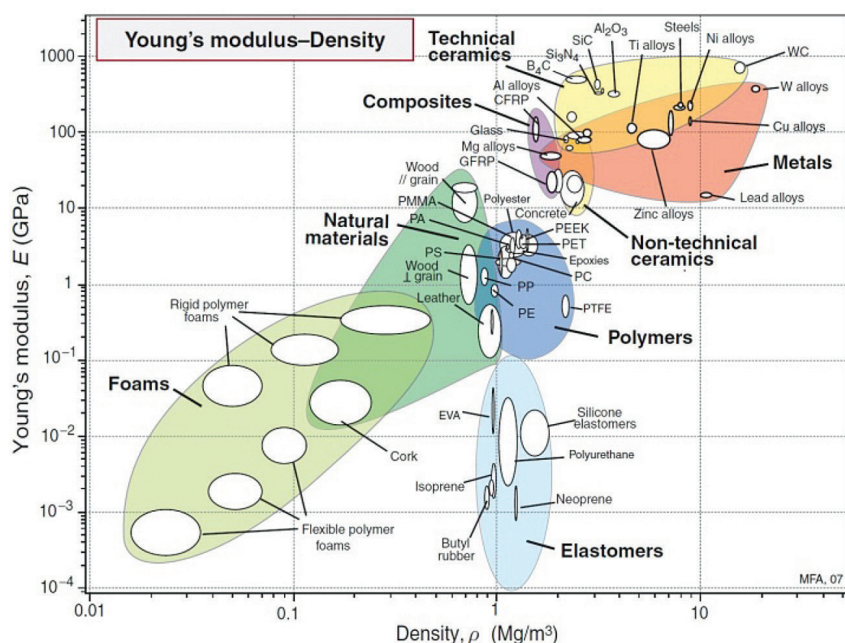


Figura 14 – Modulo di Young rispetto alla densità [17].

Figure 14 – Young's modulus VS density [17].

blema è la cattiva resistenza alla compressione e l'eccesso di comportamento anisotropo delle fibre di carbonio.

Concludiamo il confronto dei materiali meccanici facendo altre considerazioni. I materiali compositi, in questo caso CFRP e GFRP, soffrono l'umidità e l'effetto termico. Queste condizioni ambientali causano sollecitazioni interne l'applicazione di carichi. Per questo motivo è necessario proteggere la superficie del composito e vi è uno spessore extra di resina sulla superficie esterna. Non meno importante è il comportamento sotto carichi elettrici dovuto alla segnalazione a terra, come i circuiti di binario, la terra del veicolo e i transponder quindi, le rotaie sono i conduttori di ritorno per la corrente che possono anche passare attraverso le parti del carrello. È noto che la fibra di carbonio ha un alto grado di anisotropia per il coefficiente termico e le fibre di vetro hanno proprietà dielettriche. Una caratteristica importante dei materiali compositi è che non mostrano il limite di fatica (Fig. 16) come il materiale tradizionale. Questo è uno dei motivi per raggiungere maggiore conoscenza di questi materiali prima di applicarli. Ad esempio, sono stati inseriti in piccole parti dell'aereo negli anni '80 prima di

analyzed materials (Fig. 14). Thus, bogie frame is stiff enough to stay in the elastic zone when it faces with the twist track.

The CFRP has got the highest specific strength, ten times then the S355J2G3 (Fig. 15). This material is crucial in the lightweight design, but due to the low absorption energy, the Kevlar-epoxy composites is preferred in case of parts that must withstand impacts instead of CFRP. Another problem is the bad strength in compression and excess of anisotropic behaviour of the carbon fibers.

We conclude the mechanical material comparison by doing other considerations.

The composite materials, in this case CFRP and GFRP, suffer the moisture and the thermal effect. This environmental conditions cause internal stresses without applying loads. For this reason it needs to protect the surface of the composite and there is an

extra thickness of resin on the external surface.

Not less important is the behaviour under electric loads due to trackside signalling, like track circuits, earth of vehicle and balises then the rails are the return wires for the current which can also pass through the bogie parts. It is well

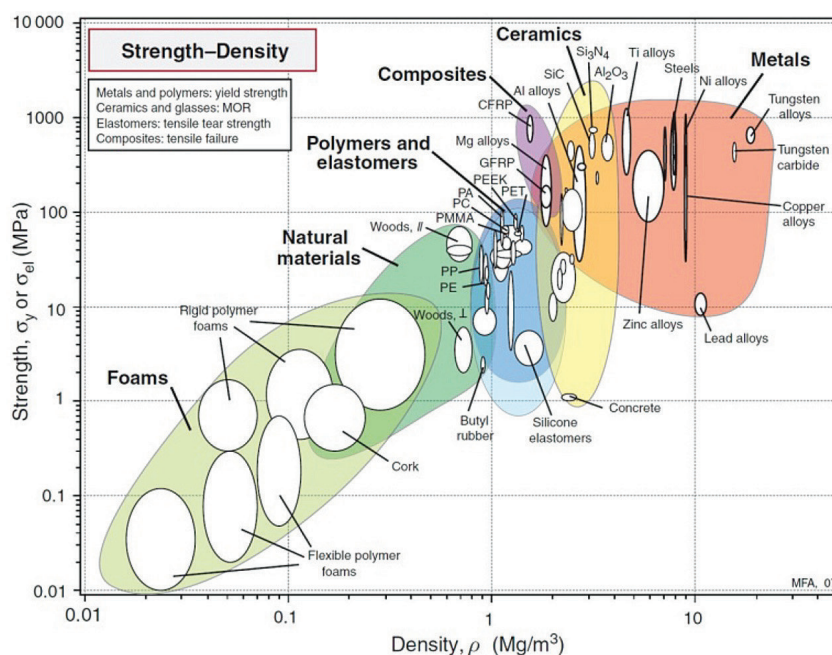


Figura 15 – Diagramma di resistenza rispetto alla densità [17].

Figure 15 – Strength VS density graph [17].



usarli per superfici aerodinamiche più grandi e strutture di aerei.

Occorre menzionare le differenze meccaniche tra i materiali considerando le modalità di rottura. I modi di rottura sono totalmente diversi nel caso di materiali tradizionali o compositi. Infatti, si applicano diverse teorie per stimare il criterio di cedimento di un laminato. Il cedimento di un composito si verifica nelle seguenti situazioni:

- frattura interlaminare che si verifica tra gli strati;
- frattura di matrice;
- rottura delle fibre;
- delaminazione che parte dai bordi del laminato;
- distacco fibra-matrice.

In generale le modalità di cedimento a compressione per un composito unidirezionale sono:

- **snervamento della matrice;**
- frantumazione delle fibre;
- microdeformazione fibra.

Probabilmente, dal punto di vista meccanico, i materiali compositi non hanno avuto successo nelle ferrovie come nel campo aerospaziale a causa di molti tipi di guasto, il limite di fatica non ben definito che è cresciuto con WHOLER, il concetto del ciclo di vita che è più lungo per il materiale rotabile rispetto agli aerei. Le particolari caratteristiche meccaniche del composito richiedono di stabi-

known that carbon fiber has got an high degree of anisotropy for thermal coefficient and glass fibers have dielectric properties.

An important characteristic of the composite materials is that they do not show the fatigue limit (Fig. 16) like the traditional material. This is one of the cause to achieve more knowledge of these materials before applying it. For instance, they were inserted in small parts of the airplane in the 80s before using them for more large aerodynamic surfaces and airplane structures.

It needs to conclude the mechanical differences among the materials by considering the rupture modes.

The manners of rupture are totally different in case of traditional materials or composites. Indeed different theories are applied to estimate the failure criterion of a laminate.

The failure of a composite happens for the following situations:

- interlaminar failure which happens between the plies;
- matrix failure;
- fiber failure;
- delamination which starts from the edges of the laminate;
- debonding fiber-matrix.

In general the compression failure modes for an unidirectional composites are:

- matrix yielding;
- fiber crushing;

- fiber microbuckling.

Probably, from the mechanical point of view, the composite materials have not got success in railways like in the aerospace field due to many failure modes, the not well defined fatigue limit that grew with Wholer, the concept of the life cycle which is longer for rolling stock than airplanes.

The particular mechanical characteristics of the composite require to set new EN standards for the frame bogies.

Moreover, it often happens that designers cope with the non-complete knowledge of the composite by using higher safety factors. Thus the structure is a bit over-sized and it reduces the advantages of specific ratios (for strength and stiffness).

The problem of material characteristics decay is huge in the railway field due to the harsh conditions of rail vehicle operation and probably the results from aeronautical field are hardly applicable to the rolling stock.

The main critical aspect is the

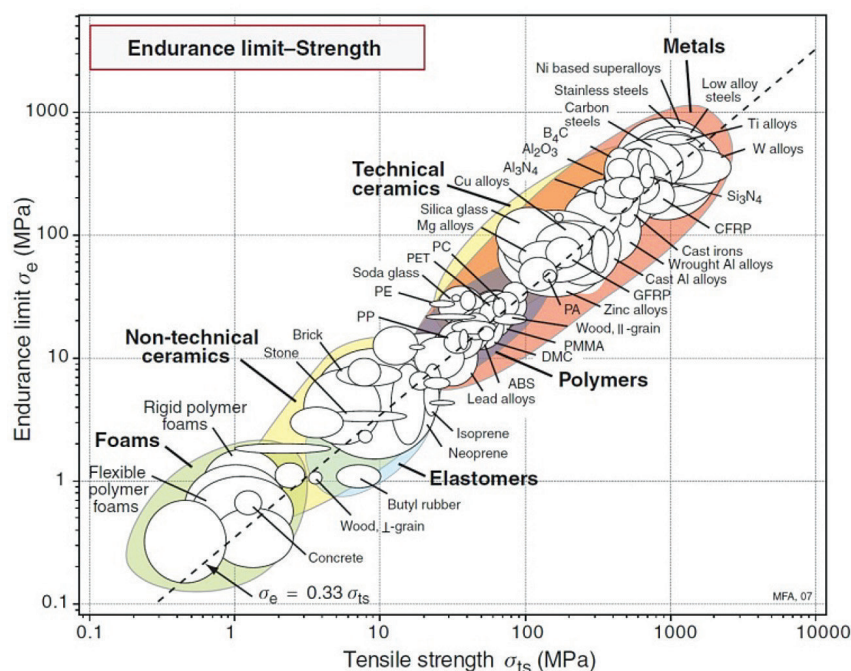


Figura 16 – Grafico del limite di fatica rispetto alla resistenza [17].

Figure 16 – Fatigue limit VS strength graph [17].



lire nuove norme EN per i carrelli con telaio in composito. Inoltre, spesso accade che i progettisti affrontino la conoscenza non completa del composito utilizzando fattori di sicurezza più elevati. Quindi la struttura è un po' sovradimensionata e riduce i vantaggi di rapporti specifici (per robustezza e rigidità). Il problema del degrado delle caratteristiche dei materiali è enorme nel settore ferroviario a causa delle dure condizioni di esercizio dei veicoli ferroviari e probabilmente i risultati del settore aeronautico sono difficilmente applicabili al materiale rotabile. L'aspetto critico principale è l'interazione ruota-rotaia e di conseguenza la fatica e lo spettro di carico sono molto diversi tra i binari e i veicoli. Altri aspetti sono che la regolazione e la fabbricazione aerospaziale è più avanzata delle regole e della produzione ferroviaria. Inoltre, vi sono maggiori probabilità di danno al materiale rotabile rispetto agli aerei.

Occorre analizzare altri aspetti per il confronto tra i materiali. In [10], si suppone che alcuni ostacoli all'adozione di nuovi materiali siano legati ai metodi di produzione e manutenzione nonché agli standard.

In [18], vi è un confronto tra proprietà di ghisa e acciaio fuso. La discussione è estesa anche per i compositi relativi alle loro caratteristiche specifiche e il ragionamento di [18] è rappresentato di seguito (Tab. 14).

È noto che i compositi hanno elevati coefficienti di smorzamento delle vibrazioni. L'affidabilità è maggiore per l'S355, perché l'ADI potrebbe avere alcuni difetti dovuti alla fusione. La peggiore affidabilità appartiene ai compositi. Il processo di produzione richiede un lavoro professionale, strumenti e procedure specifici; ad esempio, in caso di autoclave è fondamentale impostare correttamente pressione, temperatura e tempo di indurimento per ottenere buoni risultati. Piccoli errori potrebbero generare laminati difettosi a causa di difetti nelle lamine o fra esse o tra di essi.

La lavorabilità dell'acciaio (S355J2G3) e della ghisa (ADI-800) sono uguali. Al contrario questa proprietà è peggiore per i compositi. I compositi sono realizzati su misura, quindi è fondamentale progettare il prodotto finale con uno strato esterno di resina più spesso per la lavorazione di molatura e la protezione del laminato. Ulteriori processi di lavorazione, come la foratura, danneggiano le fibre di rinforzo del laminato e le prestazioni meccaniche potrebbero essere ridotte. I costi per la produzione di compositi sono elevati a causa del consumo di energia, del prezzo di alcune fibre particolari e della resina. Anche il processo di produzione ambientale è costoso, anche se questo co-

*wheel-rail interaction and consequently the fatigue and load spectrum is very different among the tracks and vehicles. Other aspects are that the aerospace regulation and manufacturing is more advanced than railway rules and production. Moreover the damage of the rolling stock has got larger likelihood than the airplanes.*

*It needs to analyze other aspects for the comparison between the materials. In [10], it is supposed that some barriers to the adoption of new materials are related to manufacturing and maintenance methods as well as standards.*

*In [18], there is a table of properties for the comparison between cast iron and cast steel. The discussion will be also done for the composites related to their specific characteristics and the reasoning of [18] is extended below (Tab. 14).*

*It is known that the composites have got high coefficients of vibration damping.*

*The reliability is higher for the S355, because the ADI could have some defects due to the casting. The worst reliability owns to the composites. The manufacturing process needs professional working, specific tools and procedures; for instance, in case of autoclave it is crucial to set correctly pressure, temperature and time of curing to get good results. Little errors could generate bad laminates due to defects into the plies or among them.*

*The machinability of the steel (S355J2G3) and cast iron (ADI-800) are equal.*

*On the contrary this property is worse for the composites. The composites are tailor-made, thus it is vital to design the final product with a thicker external layer of resin for the grinder operation and laminate protection.*

Tabella 14 – Table 14

Caratteristiche non meccaniche dei materiali tradizionali e innovativi, [12]-[18], 1 = migliore; 5 = peggiore  
No-mechanical characteristics of the traditional and innovative materials, [12]-[18], 1 = best; 5 = worst

Caratteristiche Characteristics	S355J2G3	Ferro sferoidale Spheroidal iron	Compositi Composites
Smorzamento delle vibrazioni Vibration damping	4	2	1
Affidabilità Reliability	1	2	3
Lavorabilità Machinability	2	2	4
Costo del produttore Cost of manufacturer	2	2	3
Resistenza a corrosione Corrosion resistance	4	1	3
Riparabilità Repairability	1	5	4

sto sarà risparmiato durante la vita delle parti composite.

La resistenza alla corrosione dell'acciaio e dei compositi potrebbe essere teoricamente quasi la stessa. I compositi soffrono di umidità e temperatura. La probabile corrente continua del materiale rotabile potrebbe danneggiare i materiali compositi del telaio del carrello. Anche l'alta temperatura vicino i dischi o ceppi freno potrebbe danneggiare i compositi o causare l'incendio nel polimero.

Infine, la riparabilità è fondamentale. La saldatura non è possibile nella ghisa, quindi in caso di danneggiamento, il telaio del carrello non è riparabile e deve essere rottamato. Il telaio in composito necessita di adeguate procedure di riparazione; per queste fasi vengono utilizzati adesivi, quindi necessita della polimerizzazione.

## 6. Conclusioni

Per la progettazione di un telaio del carrello merci, la ricerca [10] riferisce che il 43% della riduzione di massa ha portato a una riduzione percentuale del 5% per il consumo di energia, del 12,5% per i danni ai binari e dell'1% per le tariffe di accesso ai binari nel Regno Unito. Per quanto riguarda i carrelli passeggeri, non esistono informazioni sull'effetto della riduzione di massa sul consumo di energia, sui danni ai binari e sulle tariffe per l'accesso ai binari. Inoltre, i dati sono strettamente dipendenti dall'infrastruttura: tutti i binari e i veicoli non sono dotati di "contatori di energia"; il danno al binario è legato alla politica di manutenzione del gestore dell'infrastruttura, alle condizioni iniziali e di traffico sui binari e alla compatibilità rete-veicolo. Infine, le tariffe cambiano per ogni paese.

I nuovi materiali come compositi in fibra di carbonio e in fibra di vetro sono stati recensiti, ma si trovano anche di fronte a barriere importanti per l'implementazione e l'accettazione.

Le principali barriere sono: le normative armonizzate (ISO, CEN e CENELEC, EN) che sono riportate sui materiali tradizionali, sui codici e sugli approcci progettuali; la novità dei materiali significa know-how e database limitati, soprattutto per il comportamento del materiale durante il ciclo di vita (quasi 40 anni per il materiale rotabile). Ad esempio, per quanto riguarda la norma, è necessario un regolamento per gli adesivi e l'incollaggio dei compositi del materiale rotabile equivalente al [6] per la saldatura ferroviaria. Anche un'attenzione normativa al rischio di incendio dei compositi dovrebbe essere tenuta in considerazione. È accaduto già l'incendio di ceppi frenanti in composito e perciò "Historia magistra vitae".

Come mostrato nelle sezioni precedenti e nelle tabelle di confronto, i materiali tradizionali e innovativi considerati nelle sezioni precedenti presentano vantaggi e svantaggi. Qualunque sia il materiale scelto, per ottenere risultati ottimali è necessario tenere conto delle tre tecniche di ottimizzazione strutturale (Dimensioni, Forma, Topologia). Inoltre questi tre problemi sono strettamente connessi.

*Further machining processes, like drilling, damage the reinforcement fibers of the laminate and the mechanical performance could be reduced.*

*The costs to produce composites are high due to the energy consumption, price of some particular fibers and resin. Also the environmental manufacturing process is expensive, even if this cost will be saved during the life of the composite parts.*

*The corrosion resistance of the steel and composites could be theoretically nearly the same. Composites suffer of moisture and temperature. The probable DC current from the rolling stock could damage the composites of the bogie frame. Also the high temperature near braking discs or blocks could damage the composites or cause a fire in the polymer.*

*Finally, it is crucial the repairability. The welding is not possible in the cast iron, therefore in case of damage, the bogie frame is not repairable and it must be scrapped. The frame in composite needs appropriate repairing procedures; for these steps, adhesives are used, then it needs the polymerization.*

## 6. Conclusions

*For a freight bogie frame design, the research [10] reports that 43% of mass reduction has brought a reduction in percentage of 5% for the energy consumption, 12.5% of the track damage and 1% of reduction fees to track access for the UK track access charging. Regarding passenger bogies, no information exists on the effect of mass reduction on energy consumption, track damage, and fees to track access. Moreover the data are strictly dependent from the infrastructure: all the tracks and vehicles are not equipped with energy meters; the track damage is related to the maintenance policy of the infrastructure manager, initial and traffic condition on the tracks and to the network-vehicle compatibility. Finally, the fees change for every country.*

*The novel materials such as glass or carbon fiber composites have been applied, but they also face to significant barriers to implementation and acceptance.*

*The main barriers are: the harmonized regulations (ISO, CEN and CENELEC, ENs) which are stated on the traditional materials, codes and design approaches; the novelty of the materials means limited know-how and database, above all for the behaviour of the material during the life cycle (nearly 40 years for the rolling stock).*

*For instance, regarding to the standard, it needs a regulation for the adhesives and bonding of the rolling stock composites equivalent to the [6] for the railway welding Rule attention to the fire risk of the composites must be taken into account. It has already happened the fire of composites braking blocks and therefore "Historia magistra vitae".*

*Like it is shown in the previous sections and comparison tables, traditional and innovative materials considered in the previous sections have got advantages and disadvantages.*

si nella ricerca ottimale di Pareto.

Per quanto riguarda il materiale da utilizzare per il rotabile, un punto di vista importante è fissato dal cliente e dalle specifiche di messa in servizio. I requisiti (obiettivi) per la commissione del carrello consentono di fissare alcuni parametri di progettazione, come il materiale.

Se il costruttore del veicolo o il soggetto incaricato della manutenzione del veicolo o il detentore del veicolo non vogliono spendere denaro per la riparazione del telaio del carrello e la sua progettazione non richiede modifiche, anche per la fabbricazione, la scelta è l'ADI. La saldatura non è possibile e il processo di produzione per fusione non è complicato.

Quando il costruttore del veicolo o l'ente responsabile della manutenzione del veicolo o il detentore del veicolo desiderano un treno con facilità di riparazione ed eventuali modifiche, vengono scelti i materiali tradizionali (tipi di acciaio appropriati).

In caso di estrema necessità di leggerezza, riparazioni relativamente facili e un basso livello di modifica, sarà una buona scelta il telaio del carrello in materiale composito. Alcune operazioni come la verniciatura richiedono più ripetizioni e potrebbe essere meglio utilizzare i compositi in esercizi su binari senza massicciata.

In caso di compositi, è necessaria la massima attenzione ai processi di produzione e riparazione. Ad esempio, la foratura dei laminati è critica perché il rinforzo in fibra dello strato forato viene tagliato durante la lavorazione. Pertanto, si preferisce incollare, ma è una procedura complicata come o più della saldatura. Inoltre, è necessario che si emetta la normativa specifica necessaria per tali materiali nell'ambito ferroviario.

Riassumendo, per i risultati e i confronti proposti in questo documento, si nota la mancanza di codici di condotta per l'applicazione di materiali innovativi nel materiale rotabile. Ad esempio l'equivalente [4] per i materiali innovativi. Si evidenzia anche l'assenza di "know-how" per l'applicazione di nuovi materiali ad elementi del rodiggio, soprattutto per l'intero ciclo di vita del telaio del carrello. Questo problema è legato alla fatica e, per i compositi, anche allo stato di sollecitazione dovuto all'umidità, alla temperatura, scarica elettrica e al degrado della matrice o al suo rischio di incendio.

## 7. Ringraziamenti

Grazie al Prof. RINDI e al Prof. MELI dell'Università di Firenze, per aver programmato un corso molto interessante e utile sulle dinamiche dei veicoli ferroviari e questo lavoro è il risultato del loro insegnamento.

*Whatever material is chosen, the three structural optimization techniques (Size, Shape, Topology) must be taken into account to get optimal results. Moreover those three problems are strictly connected in the Pareto optimal search.*

*Concerning the material to use for the rolling stock, an important point of view is fixed by the customer and the commissioning specifications. The requirements (objectives) for the bogie commission allow to fix some design parameters, like the material.*

*If the vehicle manufacturer or the entity in charge of the maintenance of the vehicle or the vehicle keeper do not want spend money for the repairing of the frame bogie and its design does not require modifications, also for the manufacturing, the choice is the ADI. Welding is not possible and manufacturing process with castability is easy.*

*When the vehicle manufacturer or the entity in charge of the maintenance of the vehicle or the vehicle keeper want a train with easy repairing and possible modifications, the traditional materials (appropriate steel grades) are chosen.*

*In case of extreme lightweight needing, relatively easy repairs and a small level of modification, the composite frame bogie will be a good choice. Some operations like painting require more repetition and it could be better to use composites on the slab track without ballast.*

*In case of composites, it needs maximum attention to the manufacturing and repairing processes. For instance, the drilling of laminates is critical because the fiber reinforcement of the drilled ply is cut during the machining. Therefore bonding is preferred, but it is complicated like or more than welding. Moreover it needs that EN rules will be released properly for these materials in the railway field*

*To sum up the results and comparisons of this paper, it is noticeable the lack of codes of practice for the application of innovative materials in the rolling stock.*

*For example the equivalent [4] for the innovative materials.*

*There is a lack of know-how for the application of novel materials to the rolling stock above all for the entire life cycle of the frame bogie. This problem is related to the fatigue, and for composites also the stress status due to moisture, temperature electric discharge and the degradation of the matrix.*

## 7. Acknowledgments

*Thank you to Prof. RINDI and Prof. MELI of the University of Florence, because they have planned a very interesting and useful course about rail vehicle dynamics and this paper is a result of their teaching or its fire risk.*

## BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] R. PANAGIN (2006), "Costruzione del veicolo ferroviario", Edizione CIFI.
- [2] A. SHABANA (2008), "Railroad vehicle dynamics: A computational approach", CRC press.
- [3] M. GOBBI et al. (2006), "Optimal Design of Complex Mechanical Systems", Springer.



- [4] EN standards, EN 10025-2 – “Hot rolled products of structural steels. Technical delivery conditions for structural steels with improved atmospheric corrosion resistance”, BSI EN Standard Publication.
- [5] EN standards, EN 13749 - “Railway applications — Wheelsets and bogies — Method of specifying the structural requirements of bogie frames”, BSI EN Standard Publication.
- [6] EN standards, EN 15085 – “Railway applications — Welding of railway vehicles and components”, BSI EN Standard Publication.
- [7] EN standards, EN 12663 – “Railway applications — Structural requirements of railway vehicle bodies”, BSI EN Standard Publication.
- [8] EN standards, EN 1993 – “Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-10: Material toughness and through-thickness properties”, EN Standard Publication.
- [9] S. HALDAR, R. VERMA (2017), “Analysis of Bogie Frame Manufactured with Different Processes”, SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME) – Volume 4 Issue 5 – May 2017.
- [10] S. IWNICKI (2017), “D2.1 Light materials assessment for rail freight bogie application”, Shift2Rail.
- [11] F. BOZKURT, E. SCHMIDOVÁ (2014), “Fracture Toughness Evaluation of S355 Steel Using Circumferentially Notched Round Bars”, Periodica Polytechnica Transportation Engineering.
- [12] G. MEGNA, A. BRACCIALI *et al.* (2019), “Application of Austempered Ductile Irons to structural components of railway vehicles”, Università degli Studi di Firenze.
- [13] G.K.W. JEONA *et al.* (2011), “A study on fatigue life and strength of a GFRP composite bogie frame for urban subway trains”, Elsevier.
- [14] A.J. ALFARO (2021), “Tension study of a carbon fiber bogie frame”, Polytechnical University of Catalonia.
- [15] C. UZAY *et al.* (2016), “Impact energy absorption capacity of fiber reinforced polymer matrix (frp) composites”, Conference of the International Journal of Arts & Sciences.
- [16] T. NISHIMURA *et al.* (2016), “efWING” — New-Generation Railway Bogie”, Kawasaki Technical Review No.177.
- [17] M. ASHBY *et al.* (2007), “Materials Engineering”, Science, Processing and Design, University of Cambridge, Elsevier.
- [18] R. ELLIOT (1988), “Cast iron technology”, Butterworth & Co. (Publishers) Ltd.


**PLASTIROMA® S.r.l.**

**SEGNALI  
FERROVIARI**





**VISIERA \ VELA  
SEGNAL ALTO**

Hai un Progetto?  
**PLASTIROMA**  
ti accompagna  
**DALL'IDEA AL POST  
VENDITA**  
Con l'aiuto dei suoi  
**PERSONALI  
&  
STRUMENTI  
PLASTIROMA SRL**



**SEGNAL PL  
LATO TRENO**



**SEGNAL PL  
LATO STRADA**



**SEGNAL AVANZA-  
MENTO D'AVVIO**

**CERTIFICATO  
IP 55**



**SEGNAL INDICA-  
TORE A LED**

**PLASTIROMA**  
  
**PROGETTAZIONE  
& COSTRUZIONE  
STAMPI - STAMPAGGIO  
MATERIALI TERMOPLASTICI**  
Stabilimento: via Palombarese  
Km 19.100 00012 Guidonia  
Montecelio (RM)  
tel. 0774-367431/32  
Sede legale: via Tiburtina  
1180 00156 ROMA

**CERTIFICATO  
IP 54**



**SEGNAL BASSO**

[info@plastiroma.it](mailto:info@plastiroma.it) | [www.plastiroma.it](http://www.plastiroma.it)