



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS**

**DENISE CAROLINE REZENDE  
MICHELLE FERNANDES PEREIRA**

**MATERIAIS NÃO CONVENCIONAIS E APLICAÇÃO DE  
RESÍDUOS EM ESTRUTURAS FERROVIÁRIAS: REVISÃO**

**LAVRAS – MG  
2019**

**DENISE CAROLINE REZENDE  
MICHELLE FERNANDES PEREIRA**

**MATERIAIS NÃO CONVENCIONAIS E APLICAÇÃO DE RESÍDUOS EM  
ESTRUTURAS FERROVIÁRIAS: REVISÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal de Lavras, como parte das  
exigências do Curso de Engenharia Civil para  
obtenção do título de Bacharel.

Prof. Ms. Keoma Defaveri do Carmo e Silva  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2019**

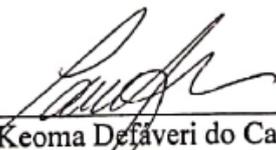
**DENISE CAROLINE REZENDE  
MICHELLE FERNANDES PEREIRA**

**MATERIAIS NÃO CONVENCIONAIS E APLICAÇÃO DE RESÍDUOS EM  
ESTRUTURAS FERROVIÁRIAS: REVISÃO**

**NON- CONVENTIONAL MATERIALS AND WASTE APPLICATION IN THE  
RAILWAY STRUCTURES: REVIEW**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal de Lavras, como parte das  
exigências do Curso de Engenharia Civil para  
obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 02 de julho de 2019.  
Profa. Dra. Andrea Aparecida Ribeiro Correa, UFLA  
Prof. Ms. Alan Pereira Vilela, UFLA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Ms. Keoma Defaveri do Carmo e Silva  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2019**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus por ter nos sustentado em todas as nossas necessidades, nos abençoado em nossas decisões e escolhas e ter nos encorajado na caminhada até aqui. Agradecemos também às nossas famílias, que sempre nos apoiaram em todos os momentos, nos deram todo o suporte necessário para essa conquista e sempre torceram pelo nosso sucesso. Aos nossos namorados, agradecemos pela paciência, apoio, auxílio e incentivo para a conclusão deste trabalho. Aos amigos agradecemos por todo incentivo.

Agradecemos aos professores que colaboraram para todo conhecimento necessário na realização deste trabalho, em especial, ao Ms. Keoma Defaveri do Carmo, nosso orientador, pela ajuda e disposição para que este trabalho fosse realizado da melhor forma possível. Obrigada por toda atenção e tempo investidos em nós. Seu auxílio foi determinante para a elaboração desse trabalho.

## RESUMO

O sistema ferroviário brasileiro apresenta um cenário evolutivo, através de constantes e progressivos investimentos, o que tende a ampliar sua importância nos transportes brasileiros. A ampliação da malha ferroviária brasileira está relacionada ao setor da construção civil, e como consequência disso torna-se um dos maiores consumidores de recursos naturais, contribuindo para a escassez das reservas, destruição da paisagem e prejuízos ao meio ambiente. Além disso, a construção civil é responsável por grande parte do consumo de energia para produção de materiais de construção e pela poluição ambiental devido à geração de resíduos e emissão de gases relacionados ao efeito estufa. Em vista disso, a incorporação de materiais sustentáveis na construção civil, inclusive nas ferrovias, é foco de diversos estudos. O objetivo deste é buscar e discutir o estado da arte acerca dos materiais não convencionais e sua potencial aplicação para ferrovias. Foram encontrados estudos utilizando escória, resíduos de borracha de pneu, polímeros reciclados, entre outros. Diversos parâmetros foram avaliados, como vibração, resistência mecânica e módulo de elasticidade. Dentre os materiais apresentados, é notório o grande potencial dos resíduos analisados, com destaque para resíduos de borracha de pneu que foram utilizados para todos os elementos da superestrutura ferroviária, com exceção dos trilhos. Entretanto, novas pesquisas são necessárias para melhor caracterização desses resíduos, assim como o estudo da viabilidade técnica da utilização de outros resíduos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Materiais sustentáveis; Ferrovia; Resíduo; Borracha de pneu; Escória.

## **ABSTRACT**

The Brazilian railway system presents an evolutionary scenario, through constant and progressive investments, which increases its importance in Brazilian transport. The expansion of the Brazilian railway network is related to the civil construction sector, and as a consequence, it becomes one of the largest consumers of natural resources, contributing to the scarcity of natural reserves, destruction of the landscape and damage to the environment. In addition, civil construction is responsible for much of the energy consumption for the production of building materials and for environmental pollution due to waste generation and greenhouse gas emissions. Thus, the incorporation of sustainable materials into civil construction, including in the railways, is the focus of several researches. The objective of this work to find and discuss the state of art of non-conventional materials and its application on the railway composition. Was found studies based on slag, tire rubber residue, recycled polymer, and others. Several parameters were evaluated as vibration, mechanical strength and young modulus. Among the materials presented, the great potential of the analyzed residues is remarkable, especially rubber tire particles that were used for all elements of the railway superstructure, with the exception of the rails. However, further research is needed to characterize these wastes completely, as well as the study of the technical feasibility of using other wastes.

**KEY WORDS:** Sustainable materials; Railroad; Residue; Tire rubber; Slag.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Propriedades do aço. ....	17
<b>Tabela 2.</b> Resultados de ensaios para concreto de borracha.....	23
<b>Tabela 3.</b> Resultados para os ensaios mecânicos com dormente de concreto com escória ....	24
<b>Tabela 4.</b> Resultados de ensaios mecânicos para concreto com rejeitos de mármore.....	25
<b>Tabela 5.</b> Resistência à compressão de diferentes porcentagens de escória.....	26
<b>Tabela 6.</b> Resistência à flexão de concreto com escória sem e com adição de fibras de aço. 26	
<b>Tabela 7.</b> Resultados dos ensaios mecânicos para o concreto com GGBF .....	27
<b>Tabela 8.</b> Resultados de resistência à compressão e impacto.....	28
<b>Tabela 9.</b> Resumo dos estudos apresentados com dormentes de concreto alternativo .....	28
<b>Tabela 10.</b> Resultados dos ensaios para dormente de plástico. ....	30
<b>Tabela 11.</b> Resultados dos ensaios mecânicos para PEAD reciclado.....	31
<b>Tabela 12.</b> Comparação com concreto C25 e madeira .....	31
<b>Tabela 13.</b> Resumo de resultados para ensaios mecânicos em dormentes de polímeros.....	32
<b>Tabela 14.</b> Caracterização física de amostras de escória.....	39
<b>Tabela 15.</b> Resistividade elétrica para amostras de escória.....	40
<b>Tabela 16.</b> Propriedades mecânicas para sublastro com partículas de borracha .....	47

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1.</b> Projetos em andamento de ferrovias no Brasil.....	12
<b>Figura 2.</b> Constituição da superestrutura ferroviária. ....	15
<b>Figura 3.</b> Ângulo de atrito interno e Força de coesão: Testes laboratoriais. ....	35
<b>Figura 4.</b> Ângulo de atrito interno e força de coesão: MED. ....	36
<b>Figura 5.</b> Comportamento do sistema com adição de partículas de borracha .....	38
<b>Figura 6.</b> Resultados obtidos pelos quatro acelerômetros na camada com sublastro convencional e na camada com adição de 5% de partículas de borracha. ....	48

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1**

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
-------------------------	----

### **CAPÍTULO 2**

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2. SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA</b> .....	15
<b>3. TRILHOS</b> .....	17
<b>4. DORMENTES</b> .....	19
4.1. <b>Materiais Convencionais</b> .....	20
4.2. <b>Materiais Não Convencionais</b> .....	22
4.2.1. Concreto Ecológico.....	22
4.2.2. Polímeros Reciclados.....	29
<b>5. LASTRO</b> .....	33
5.1. <b>Materiais Convencionais</b> .....	34
5.1.1. Partículas de Borracha.....	34
5.1.2. Escória.....	38
5.1.3. Resíduo de Construção e Demolição .....	41
<b>6. SUBLASTRO</b> .....	43
6.1. <b>Materiais Convencionais</b> .....	43
6.2. <b>Materiais Não Convencionais</b> .....	44
6.2.1. Pneu de Borracha .....	44

### **CAPÍTULO 3**

<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	51
--------------------------------------	----

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

Este trabalho de conclusão de curso consiste em um artigo de revisão bibliográfica sobre o uso de resíduos para os elementos da superestrutura ferroviária, composto por 3 capítulos. O primeiro capítulo, traz a divisão e a forma como o trabalho foi organizado.

No capítulo 2 será apresentado o artigo, composto por 6 tópicos. O primeiro tópico é uma introdução sobre ferrovias abordando a malha ferroviária brasileira e projetos para sua futura expansão e quais são os problemas ambientais causados pelo setor. O segundo tópico aborda a superestrutura ferroviária, explicando quais são seus elementos e a função de cada um na via. O terceiro tópico é a explicação sobre os trilhos, quais são suas funções e especificações que devem ser consideradas para a escolha do material. O quarto tópico traz a abordagem de dormentes, explicando sua função, os materiais comumente utilizados e os estudos encontrados acerca de materiais não convencionais para substituição dos materiais convencionais. O quinto tópico trata do lastro ferroviário, definindo sua função na ferrovia e as especificações técnicas para esse elemento. Aborda os materiais convencionais utilizados para a camada e traz estudos com materiais alternativos. Finalizando os elementos ferroviários, o sexto tópico aborda o sublastro de ferrovias, sua definição, função e especificações segundo normas brasileiras. Traz os principais materiais convencionais utilizados e os novos materiais em estudo.

Por fim, no capítulo 3, aborda-se as discussões e considerações finais acerca dos diferentes estudos mencionados ao longo do capítulo anterior. São, ainda, sugeridas novas linhas de pesquisa sobre o tema.

## CAPÍTULO 2

### 1. INTRODUÇÃO

Apesar do modal ferroviário ser o segundo mais utilizado no Brasil, a malha ferroviária do país ainda é pequena quando comparada a outros países, correspondendo somente a pouco mais de 12% da malha ferroviária dos Estados Unidos (DOS SANTOS et al., 2018).

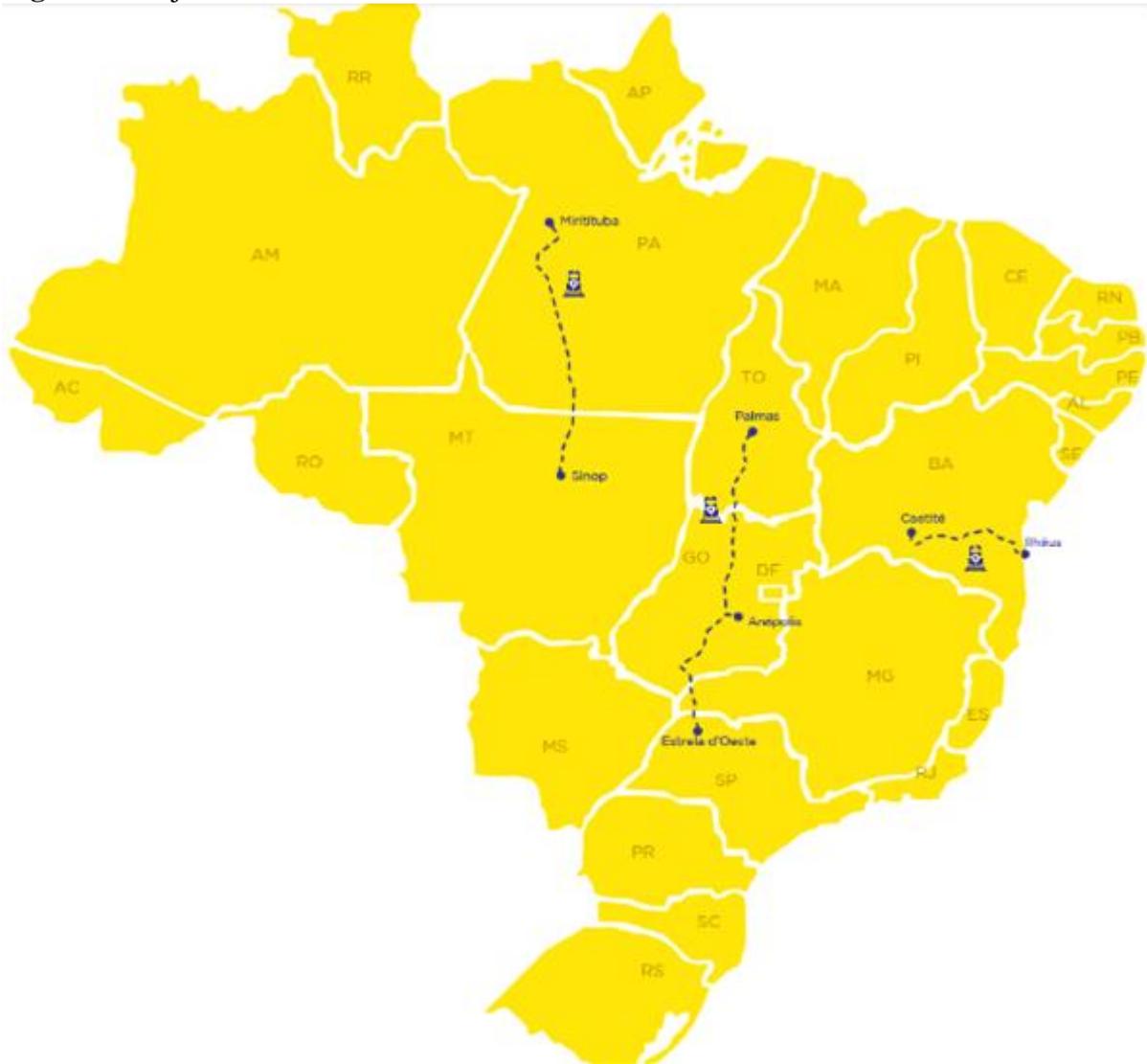
A grande maioria da carga no Brasil é escoada pelo transporte rodoviário, porém, para um país com a extensão do Brasil, a presença de um sistema logístico mais eficiente possibilitaria a redução dos custos do transporte, tornando o país mais competitivo no mercado internacional (BENETTI, 2013; D. N. CARVALHO, 2019). A utilização do modal ferroviário seria capaz de reduzir o custo do frete em 50%, quando comparado ao modal rodoviário (SILVA JUNIOR, 2007). Além disso, a substituição do transporte rodoviário pelo ferroviário é capaz de retirar muitos veículos de carga das rodovias brasileiras que já estão saturadas (CORDEIRO, FRANCO e DOS SANTOS, 2016).

O sistema ferroviário brasileiro apresenta um cenário evolutivo, através dos constantes e progressivos investimentos, o que tende a ampliar sua importância nos transportes brasileiros (SILVA JUNIOR, 2007). De acordo com o Programa de Parcerias de Investimentos do Governo Federal (2019), cinco projetos de ferrovias estão em andamento no Brasil buscando a ampliação da malha ferroviária. Essas ferrovias irão abranger estados do Sudeste, Norte e Nordeste, facilitando o escoamento de produtos entre os estados. A Figura 1 apresenta os projetos ferroviários brasileiros atuais.

A ferrovia Ferrogrão que liga Sinop (MT) e Itaituba (PA), com cerca de 933 km, terá concessão no terceiro trimestre de 2019 e foi projetada com capacidade de 42 milhões de toneladas. A Ferrovia Norte-Sul terá sua ampliação, com trechos de 1537 km de extensão que vão de Porto Nacional (TO) à Estrela d'Oeste (SP). As obras dessa concessão estão em fase de finalização visto que o primeiro trecho que vai de Palmas (TO) à Anápolis (GO) já está em operação e o trecho de Ouro Verde de Goiás (GO) à Estrela d'Oeste (SP) está 95% concluído. No quarto trimestre de 2019, a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) irá ainda realizar a concessão da Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL), entre Ilhéus (BA) e Caetité (BA), com extensão de 537 km e 76% da execução física da obra concluída. Além dessas concessões, outras duas ferrovias estão em fase de estudo, sendo elas um trecho da Ferrovia de

Integração Centro-Oeste entre Campinorte (GO) e Água Boa (MT), com 383 km de extensão e grande importância para escoar a produção de grãos dessa região, e o Tramo Norte do Ferroanel de São Paulo que será um ramal ferroviário de 53 km de extensão. Esta última tem os objetivos de eliminar o conflito entre cargas e passageiros nos trilhos da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) e permitir o escoamento de cargas do interior do estado para o Porto de Santos (GOVERNO FEDERAL DO BRASIL, 2019).

**Figura 1.** Projetos em andamento de ferrovias no Brasil.



Fonte: Programa de Parcerias de Investimento, 2019.

A ampliação da malha ferroviária pode gerar diversos benefícios ao país, entretanto, faz-se necessário avaliar outras questões importantes relacionadas à sua implementação, como por exemplo, a questão ambiental. Apesar do modal ferroviário apresentar impactos ambientais menores quando comparado aos impactos ambientais apresentados pelo modal rodoviário,

como toda e qualquer grande obra de infraestrutura, a implementação de uma ferrovia não está isenta de impactos ambientais (ELLER, SOUSA JUNIOR e CURI, 2011).

A construção civil é responsável pela produção dos maiores bens do planeta em termos de dimensões físicas, e como consequência disso torna-se o maior consumidor de recursos naturais, o que pode acarretar o esgotamento das reservas naturais, destruição da paisagem e prejuízos a fauna e flora. Além disso, a construção civil é responsável por grande parte do consumo de energia para produção de materiais de construção e pela poluição ambiental devido à geração de resíduos e emissão de gases do efeito estufa. Visto isso, é necessário investir no desenvolvimento sustentável da construção civil, em toda sua cadeia produtiva. Isso inclui desde a produção de materiais de construção até etapas de demolição de estruturas (JOHN, 2000).

Em vista disso, a incorporação de materiais sustentáveis na construção civil, incluindo a construção de ferrovias, é algo crescente. Muitos estudos estão sendo realizados procurando materiais alternativos para uso nos diversos elementos ferroviários. A busca é por materiais que sejam reciclados, dando a eles um novo destino, e que após seu uso ainda possam ser reutilizados, para que não haja geração de resíduos após a manutenção das ferrovias.

Um exemplo de resíduo com grande potencial para reaproveitamento é a partícula de pneus de borracha. Estima-se que a cada ano, aproximadamente 17 milhões de toneladas de pneus chegam ao fim de sua vida útil e esse número tem crescido constantemente (World Business Council for Sustainable Development, 2010). Pressupõe-se que, em 2030, a quantidade de veículos com motor chegue a 1200 milhões, sendo necessário reciclar, anualmente, 5000 milhões de pneus (TORGAL e JALALI, 2010). A deposição desses pneus em lixões pode parecer, em um primeiro momento, a solução mais fácil para dar a eles uma destinação final, entretanto, os pneus liberam toxinas no solo e na água e, quando não enterrados, acumulam água gerando local para proliferação de mosquitos que transmitem doenças e geram grande risco à saúde. Além disso, lixões ou depósitos de pneus possuem grande potencial de incêndio e alimentam as chamas por longos períodos. No país de Gales, em 1989, um depósito com cerca de 10 milhões de pneus pegou fogo, permanecendo em chamas até 2004, totalizando 15 anos de incêndio (WILLIAMS, 2017).

Portanto, este trabalho tem como objetivo identificar e comparar estudos do desempenho de materiais não convencionais para composição da superestrutura ferroviária, incluindo trilhos, dormentes, lastro e sublastro. A incorporação de resíduos como materiais alternativos visa mitigar a geração de resíduos, reduzir o consumo de matéria prima não renovável e os impactos ambientais causados no processo.

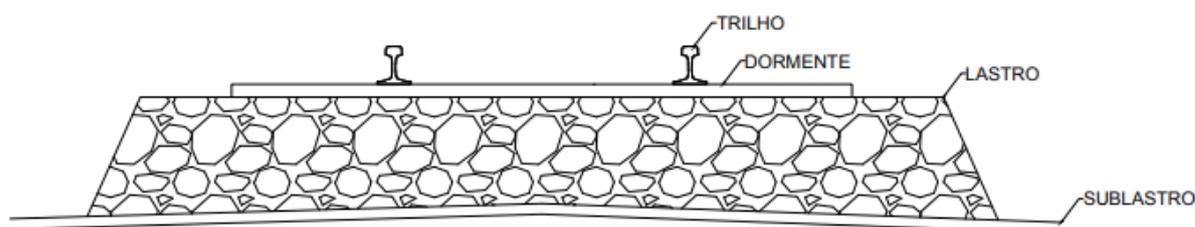
## 2. SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA

A ferrovia é dividida em infraestrutura e superestrutura. A infraestrutura é composta por serviços de terraplenagem (corte e aterro), obras de arte corrente para drenagem da via, e obras de arte especiais como pontes, viadutos e túneis, que são obras abaixo do greide da ferrovia. As obras de arte especiais são feitas apenas quando não há outra alternativa, visto que possuem elevado custo de construção e são obras com maior complexidade de execução. Porém, podem ser necessárias devido ao relevo do terreno e outros obstáculos que podem ser encontrados no traçado da ferrovia (NETO, 2012).

Segundo Brina (1979), a superestrutura ferroviária é constituída pela via permanente, incluindo os trilhos, dormentes, lastro e sublastro. É responsável por suportar a intempéries, a desgaste e a esforços devidos ao tráfego do material rodante, garantindo estabilidade longitudinal, lateral e vertical do sistema. É importante que esses elementos sejam dimensionados de modo a permitir a manutenção e renovação dos seus constituintes quando sofrem desgaste, visto que isso pode diminuir a segurança e comodidade da circulação (BRINA, 1979).

A Figura 2 apresenta a disposição dos elementos da superestrutura ferroviária.

**Figura 2.** Constituição da superestrutura ferroviária.



Fonte: Autores.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) traz definições de cada elemento nas Instruções de Serviço Ferroviário (ISF). Os trilhos são os elementos por onde o material rodante trafega. Recebem diretamente os esforços devido ao deslocamento do veículo, funcionando como uma viga contínua, e devem transmitir essa carga para os dormentes. O dormente, por sua vez, tem função de transmitir ao lastro o esforço recebido pelos trilhos. Além disso, os dormentes são os locais onde os trilhos são fixados (ISF – 213, 2015).

Já o lastro é responsável por receber os esforços dos dormentes e transmitir para o sublastro, minimizar as vibrações provenientes do tráfego de veículos, uniformizar a via formando uma superfície contínua e não permitir a movimentação dos dormentes. O sublastro é a camada que liga a superestrutura à infraestrutura, transmitindo para as camadas inferiores esforços em taxa adequada à capacidade de suporte do terreno, garantindo o bom desempenho da via (ISF – 212, 2015).

Nos próximos tópicos serão abordados os elementos da superestrutura ferroviária, quais são os materiais convencionais utilizados para a construção de cada um deles e os materiais não convencionais que vêm sendo estudados.

### 3. TRILHOS

Os trilhos possuem duas funções principais: servir como guia, constituindo a superfície de rolamento por onde trafega o material rodante e transmitir os esforços oriundos desse tráfego para a infraestrutura viária. Para desempenharem bem suas funções, os trilhos devem ser de material com dureza e tenacidade elevadas, relativa elasticidade e alta resistência à flexão, sendo o aço o material mais adequado para atender a essas características (ISF – 213, 2015; SEMPREBONE, 2005; BRINA, 1979).

O aço é composto basicamente por ferro (98%), carbono, manganês, silício e fósforo. Cada elemento possui uma função específica que tem a capacidade de melhorar ou reduzir o desempenho do aço. O ferro é responsável por aumentar a resistência mecânica do aço, porém, diminui sua resistência ao choque e à soldabilidade, além de diminuir sua ductilidade. O carbono aumenta a dureza do aço, mas aumenta também sua fragilidade. O manganês é responsável pelo aumento da forjabilidade do aço, temperabilidade, limite elástico e resistência ao choque, mas diminui sua ductilidade. O silício, além de minimizar o efeito do desgaste é agente desoxidante. O fósforo aumenta a fragilidade do aço, sendo considerado prejudicial às propriedades mecânicas do mesmo (MACÊDO, 2009).

De acordo com o manual da AREMA – *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association* (2013), o aço para uso em trilhos intermediários, deve atender aos padrões de resistência mecânica apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Propriedades do aço.

<b>Propriedade</b>	<b>Valor mínimo requerido</b>
<b>Dureza superficial (HB)</b>	325
<b>Limite de escoamento (MPa)</b>	551
<b>Limite de resistência (MPa)</b>	1013
<b>Alongamento (%)</b>	10

Fonte: AREMA, 2013; PORCARO et al., 2017.

Apesar das exigências de resistência mecânica e demais propriedades necessárias para a utilização de um determinado tipo de aço nos trilhos ferroviários, estes ainda apresentam sérios problemas relacionados ao seu desgaste e manutenção. Por se tratar do material mais caro na construção da superestrutura ferroviária e envolver questões de segurança da via, as pesquisas relacionadas aos trilhos ferroviários são voltadas ao seu desgaste e tentativa de

melhorar as propriedades do aço empregado nessa finalidade (MACÊDO, 2009; SEMPREBONE, 2005; WANG e ZHOU, 2018; CIOTLAUS et al., 2019).

Na busca realizada na literatura não foram encontrados estudos para a substituição do aço por material não convencional ou incorporação de algum tipo de resíduo em sua confecção. A hipótese levantada para a falta desses estudos pode ser explicada pela necessidade de uma combinação de propriedades muito específicas que são encontradas, até então, somente no aço.

#### 4. DORMENTES

Os dormentes são peças da superestrutura de ferrovias responsáveis por receber os esforços produzidos pelos materiais rodantes através dos trilhos e transmitir para o lastro. Além disso, é o suporte para os trilhos, e deve permitir sua fixação e manter a distância entre eles, chamada de bitola, invariável. O dormente deve ainda se opor de maneira eficaz aos deslocamentos longitudinais e transversais da ferrovia (BRINA, 1979). Para isso, é necessário que o dormente tenha boa resistência e rigidez, alta durabilidade e consiga amortecer as vibrações (ICIMOTO, 2013).

O material mais comum para ser utilizado em dormentes é a madeira, correspondendo a 80% dos dormentes nas ferrovias brasileiras (COLENCI, 2002), mas devido à escassez de madeiras de qualidade para este uso e os preços cada vez maiores, há um aumento no uso de aço ou concreto protendido para dormentes. Algumas vantagens nesta substituição é que o tempo de vida útil de aço e concreto são maiores, aumentando o período para troca e manutenção dos dormentes (MANALO et al., 2009). Porém, estes materiais também apresentam falhas e desvantagens. Por conta disso, muitas pesquisas estão sendo feitas para substituir os materiais convencionais por outros, inclusive que sejam ainda sustentáveis de modo a reduzir os impactos ambientais causados pela construção civil. A seguir, serão discutidos quais são os pontos negativos e positivos dos materiais convencionais utilizados em dormentes e serão abordados os materiais alternativos que têm sido estudados para substituição dos materiais convencionais.

As normas brasileiras para dormente não estabelecem parâmetros fixos para valores mínimos para as propriedades mecânicas, visto que para cada ferrovia tem-se um tipo de carregamento a ser considerado, dependendo do material rodante e da carga que será transportada. Portanto, os estudos apresentados neste trabalho fazem a comparação com materiais diferentes dependendo do tipo de pesquisa realizada. A análise e comparação dos dados serão realizadas por tabelas que possibilitem a avaliação da viabilidade técnica do uso de tais materiais.

#### 4.1. Materiais Convencionais

Os materiais convencionais utilizados em dormentes de ferrovias são a madeira, o concreto de cimento Portland e o aço. A madeira é amplamente utilizada. Suas vantagens incluem sua adaptabilidade, a boa trabalhabilidade e facilidade na manutenção ou troca da peça (ZAREMBSKI, 1993, apud MANALO et al., 2009), além de ter excelentes propriedades mecânicas, elétricas e isolantes (KAEWUNRUEN, 2010, apud FERDOUS et al., 2015). A madeira é um material de fonte renovável, tem baixo custo energético para produção e os dormentes substituídos podem ser reutilizados para outros fins, ou reciclados (ICIMOTO, 2013). Porém, tem a desvantagem de precisar de reparos em períodos mais curtos de tempo, pois não tem boa resistência à degradação química, mecânica e biológica (QIAO, DAVALOS e ZIPFEL, 1998). O clima, a drenagem da via, o peso e a velocidade dos trens, a época do ano em que é feito o corte da madeira e o teor de umidade influenciam diretamente na durabilidade deste material (BRINA, 1979).

Segundo Van, Cattell e Heldt (2005, apud FERDOUS e MANALO, 2014) sua falha pode ser por apodrecimento, já que é um material orgânico e está exposto a biodegradação. A madeira pode absorver umidade e assim proliferar fungos que se espalham de um dormente para outro, afetando a integridade da estrutura ferroviária. Outra falha é devido ao excesso de cargas de cisalhamento, que causa rachaduras próximas aos locais de fixação dos trilhos do dormente de madeira, abrindo fendas e diminuindo a resistência do material. Além disso, a madeira está exposta a ação de cupins que causam danos permanentes no dormente. Por esses problemas, seu tempo de vida útil é reduzido e a manutenção deve ser feita em períodos mais curtos.

É importante ter em vista a questão ambiental no uso deste material. Apesar de ser um produto renovável, é necessário o desmatamento para fornecer a madeira para os dormentes. Por conta disso, órgãos ambientais aumentaram suas exigências e o produto passou a ser fabricado com madeiras de áreas de reflorestamento, que são madeiras macias, como o eucalipto. Esse tipo de madeira apresenta resistência mecânica menor que a madeira nativa e falha principalmente por desgaste mecânico, e não mais por degradação biológica e química. Além disso, ao final do ciclo de vida da madeira, muitas vezes esta não é reutilizada ou reciclada e segue para a queima, o que emite carbono para a atmosfera, poluindo o ar e favorecendo o efeito estufa (SALLES, 2009).

O uso de dormentes de concreto de cimento Portland foi iniciado na década de 1950, visto que este material tem diversas vantagens em seu uso, como a longa vida útil (cerca de 50 anos), maior peso na linha favorecendo a resistência e estabilidade, e a facilidade de isolamento do trilho (ICIMOTO, 2013). O concreto tem a melhor resistência lateral entre os três materiais convencionais de dormentes (BACKTIARY et al., 2015). Existem basicamente dois tipos de dormentes de concreto, o dormente bi-bloco de concreto armado e o dormente monobloco de concreto protendido. O primeiro consiste em dois blocos de concreto armado sob cada trilho ligados por um perfil de aço com resistência elevada à corrosão. Este tipo de dormente é leve e mais flexível, proporcionando suavidade para o tráfego dos veículos. Proporciona uma boa resistência lateral e estabilidade para a via. O dormente monobloco é constituído apenas por uma peça rígida de concreto protendido que vai de um trilho ao outro. Este tipo de dormente possui massa elevada, por isso é utilizado em vias com cargas por eixo maiores. São mais econômicos que os dormentes bi-bloco por gastar menos aço (ICIMOTO, 2013). Resistem a grandes momentos fletores provenientes das ações dinâmicas (TRINDADE, 2012). A Norma Brasileira para dormentes de concreto (NBR 11709, 2015) especifica que o concreto utilizado para dormentes deve ter resistência à compressão mínima de 40 MPa no caso de bi-bloco e 45 MPa para monobloco.

As desvantagens no uso de concreto para dormentes é que quando ocorrem descarrilamentos, estes são destruídos, o preço para implantação é elevado e é vulnerável a solicitações excepcionais (ICIMOTO, 2013). Dyk et al. (2012, apud FERDOUS e MANALO, 2014) indica quais são as causas mais comuns de falhas de dormentes de concreto. A pior é o desgaste pelos trilhos, por conta da abrasão, erosão hidro-abrasiva, quebra por pressão ou deterioração química.

Um ponto importante a ser considerado no uso de dormentes de concreto é a questão ambiental. O cimento Portland é o maior responsável pelo baixo desempenho ambiental do concreto convencional. Na produção de cimento, é liberada 5-7% da produção de CO<sub>2</sub> mundial (IACOBESCU et al., 2011; ALI e HOSSAIN, 2011; KAJASTE e HURME, 2016; CARVALHO et al., 2019). Além dos gases que impactam no aquecimento global, a indústria de cimento tem grande potencial poluidor em todo o processo produtivo. Apesar do desenvolvimento de estudos que visam a destinação para resíduos de concreto, muitas vezes este resíduo não é reciclado ou reutilizado (MAURY e BLUMENSCHNEIN, 2012).

Os dormentes de aço consistem de uma chapa laminada curvada nas extremidades para fixação no lastro. Essas “garras” ajudam na oposição aos deslocamentos transversais da via (BRINA, 1979). Este tipo de dormente tem vida útil longa, facilidade de confecção de dormentes especiais, não é submetido a ataques de fungos, mantém a bitola de maneira efetiva e é um material com boa resistência mecânica. Outra vantagem é que este material pode ser reciclado, reduzindo a quantidade de resíduos gerados pela manutenção das vias. Suas desvantagens são a massa reduzida, o que o prejudica em linhas de tráfego pesado, o ruído intenso, o custo para aquisição, instalação e manutenção elevado, o alto gasto energético para sua produção, e a geração de escória (ICIMOTO, 2013). No caso do aço, segundo Ferdous e Manalo (2014), as falhas são principalmente devido à corrosão do aço e rachaduras por fadiga na região da fixação dos trilhos.

## **4.2. Materiais Não Convencionais**

A questão da sustentabilidade tem se mostrado um importante elemento na escolha dos materiais utilizados em todos ramos da construção civil. Devido a isso e tendo em vista que os materiais convencionais utilizados em dormentes são causadores de impactos ambientais, vários estudos estão sendo feitos nos últimos anos visando encontrar materiais alternativos para essa função. Campos (2015) destaca alguns pontos importantes na escolha do material para dormente, incluindo a vida útil, a quantidade de energia e recursos consumidos para produção do material e a possibilidade de reutilização ou reciclagem dos dormentes que precisam ser trocados para que não sejam produzidos resíduos em larga escala.

### **4.2.1. Concreto Ecológico**

Hameed e Shashikala (2016) analisaram o concreto de borracha para dormentes e o comparou com o dormente de concreto protendido normalmente utilizado. O chamado “concreto de borracha” foi feito substituindo 15% do volume dos agregados miúdos por pedaços de borracha obtidos de centros de recauchutagem de pneus. Esses fragmentos foram peneirados para que suas dimensões se encaixassem nas exigências para emprego como agregado miúdo utilizado para concreto. O dormente de concreto com borracha foi produzido para que atingisse resistência à compressão de 50 MPa, assim como o dormente de concreto convencional. Para o dormente ecológico foi realizado o teste de carga de impacto, seguindo as

especificações da ACI – *American Concrete Institute* (544.2R-89, 1999). A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos pelo ensaio de impacto para o concreto de borracha.

**Tabela 2.** Resultados de ensaios para concreto de borracha.

<b>Material</b>	<b>Força para formação da primeira fissura (Nm)</b>	<b>Resistência de impacto (Nm)</b>
<b>Concreto de borracha</b>	617,50	1520,00
<b>Concreto convencional</b>	95,00	523,50
<b>Aumento* (%)</b>	550,00	190,35

\*Aumento do valor das propriedades do concreto de borracha em relação ao valor encontrado para o concreto convencional.

Fonte: Hameed e Shashikala, 2016 (Adaptado).

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, a resistência ao impacto do concreto de borracha foi de 1520 Nm, ao passo que do concreto convencional foi de 523,5 Nm, caracterizando um aumento de 522,5 Nm na resistência. É possível ainda perceber que a força requerida para a formação da primeira fissura no concreto de borracha foi maior que a força de impacto necessária para o rompimento do concreto convencional, o que é um resultado satisfatório. A borracha tem maior capacidade de absorção de energia, portanto resiste mais ao impacto que o concreto convencional. Tendo em vista a questão ambiental, o concreto de borracha diminui a utilização de agregados convencionais na produção de concreto e reutiliza borracha que normalmente é descartada como resíduo, produzindo compósitos com desempenho superior ao material convencional.

Já Koh et al. (2015) fez um estudo de concreto ecológico para dormentes, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa de Ferrovias da Coreia (KRRI) com o intuito de reduzir a emissão de CO<sub>2</sub>, um dos maiores problemas ambientais causados pela produção de cimento, e procurar um substituto para o agregado miúdo natural visto que um dos problemas da Coreia é a escassez de areia natural. Para isso, utilizou escória granulada de alto forno (GGBF) substituindo 30% do cimento Portland e escória de alto forno de arco elétrico (EAF), subproduto da indústria siderúrgica, como substituto dos agregados miúdos. Os testes realizados para este material foram de resistência à fadiga e flexão para cargas dinâmicas e estáticas, de acordo com a KRS - *Korean Railway Standards* (KRS TR 0008-11 (R), 2011). Na Tabela 3, são apresentados os

resultados obtidos no testes de resistência à compressão, resistência à fadiga, resistência à flexão estática e resistência à flexão dinâmica para o concreto com escória e o concreto convencional e os resultados mínimos exigidos pela norma coreana KRS TR 0008-11 para dormente de concreto.

**Tabela 3.** Resultados para os ensaios mecânicos com dormente de concreto com escória.

Material	Compressão aos 7 dias (MPa)	Compressão aos 28 dias (MPa)	Fadiga (kN)	Flexão estática (kN)	Flexão dinâmico (kN)
Concreto com escória	51,20	72,80	700,00	705,50	542,00
Concreto convencional	36,70	58,50	480,00	444,00	419,00
Norma KRS TR 0008-11	35,00	50,00	385,00	-	-

Fonte: Koh et al., 2015 (Adaptado).

O concreto com GGBF e EAF apresentou resistência à compressão em 24 horas de 51,20 MPa e em 28 dias de 72,80 MPa, sendo adequada aos requisitos para dormentes de concreto e maior em 46% e 44% ao mínimo exigido pela norma coreana, respectivamente. Além disso, apresentou resistência à compressão superior ao concreto convencional. Para a fadiga, o resultado foi também satisfatório, tendo sua ruptura com 700,00 kN, enquanto o convencional teve ruptura com 480,00 kN. O mínimo exigido pela norma coreana é de 385,00 kN. No teste de flexão estática, o dormente de concreto com escória rompeu à flexão com um carregamento de 705,50 kN enquanto o dormente de concreto convencional rompeu à flexão com carregamento de 444,00 kN. No teste de flexão dinâmica, o concreto com escória teve resistência de 542,00 kN e o concreto convencional obteve resistência 123,00 kN menor, rompendo com 419,00 kN (KOH et al., 2015). Foi concluído que o concreto desenvolvido pelo KRRRI superou a resistência e o desempenho mecânico exigidos pela norma coreana para dormentes de concreto protendido. Portanto, é um material sustentável e com bom desempenho, viável do ponto de vista mecânico para utilização como dormente.

Maia (2012) trabalhou na avaliação de propriedades de um concreto sustentável chamado de ECODOR feito com cimento Portland, rejeito de mármore em substituição total à areia natural, rocha gnáissica britada e rejeito de fibras óticas como fibra. Foram feitos ensaios de caracterização mecânica e física seguindo as normas brasileiras vigentes. O traço foi feito objetivando-se resistência a compressão aos 28 dias de 40 MPa, o mínimo exigido pela norma brasileira de dormente de concreto (NBR 11709, 2015). Os ensaios realizados foram de

resistência a compressão axial, resistência a tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Resultados de ensaios mecânicos para concreto com rejeitos de mármore.

Material	Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Resistência à tração diametral (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Concreto com rejeito de mármore	36,98	46,30	5,19	6,15	40,93
Concreto convencional	-	46,30	4,30	2,97	38,10

Fonte: Maia, 2012 (Adaptado).

Os resultados obtidos foram comparados com um concreto convencional de resistência à compressão de 46,30 MPa, mesmo valor obtido para o concreto com rejeito de mármore. O concreto convencional apresentou resistência à tração por compressão diametral de 4,30 MPa enquanto o concreto com rejeito de mármore obteve resistência de 5,19 MPa para o mesmo ensaio. Para a resistência à tração na flexão, o concreto com rejeito de mármore rompeu com 6,15 MPa e o concreto convencional obteve resistência de 2,97 MPa, 51,7% menor que o concreto de mármore. Maia (2012) afirma que a resistência à tração na flexão é de extrema importância visto que o dormente de concreto sofre solicitações em áreas específicas, onde estão os trilhos, o que aumenta os momentos fletores. O concreto convencional com resistência à compressão de 46,30 MPa teria, ainda, módulo de elasticidade de 38,10 GPa, enquanto o concreto sustentável em estudo obteve um valor de 40,93 GPa, 7,4% superior. Isso deve-se à adição de fibras óticas que reduzem a rigidez do material. Maia (2012) enfatiza também o aspecto ecológico envolvido com a redução do consumo de cimento, que conforme mencionado anteriormente neste trabalho, tem sua produção ligada à produção de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

Shin et al. (2016) utilizou dormentes de concreto com escória granulada de alto forno e fibras de aço. A escória foi substituta do cimento Portland CPIII no concreto, com diferentes porcentagens, sendo elas 42, 49 e 56%. O estudo foi feito com o intuito de analisar qual seria o impacto da porcentagem de escória no concreto na resistência à compressão do dormente. O modelo com melhor desempenho foi o concreto com 56% de escória. Para este modelo, foi verificado ainda o desempenho à flexão com e sem adição de fibra de aço. Este concreto atingiu resistência à compressão de 68,90 MPa, maior que o mínimo exigido pela norma seguida no estudo, que é a Norma Coreana para Ferrovias (KRS TR 0008-11 (R), 2011). Esta norma

especifica que a resistência mínima é de 50 MPa aos 28 dias. Os resultados do ensaio de compressão se encontram na Tabela 5. Os resultados do ensaio de resistência à flexão do modelo com melhor desempenho à compressão são apresentados na Tabela 6. Os resultados de flexão demonstram que o concreto produzido com substituição de cimento por 56% de escória tem melhor desempenho na flexão, com resistência 20% maior que o concreto convencional. Melhor ainda é o desempenho quando se utiliza o concreto reforçado com fibras de aço, obtendo-se 36% maior resistência que o concreto convencional.

**Tabela 5.** Resistência à compressão de diferentes porcentagens de escória.

<b>Material</b>	<b>Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)</b>
<b>Concreto convencional</b>	72,10
<b>Concreto com 42% de escória</b>	67,50
<b>Concreto com 49% de escória</b>	65,90
<b>Concreto com 56% de escória</b>	68,90

Fonte: Shin et al., 2016 (Adaptado).

**Tabela 6.** Resistência à flexão de concreto com escória sem e com adição de fibras de aço.

<b>Material</b>	<b>Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)</b>	<b>Resistência à flexão (MPa)</b>
<b>Concreto convencional</b>	72,10	5,87
<b>Concreto com escória sem fibras de aço</b>	68,90	7,08
<b>Concreto com escória com fibras de aço</b>	73,80	7,99

Fonte: Shin et al., 2016 (Adaptado).

Yang et al. (2017) desenvolveu uma pesquisa investigando os benefícios do uso escória granulada de alto forno (GGBF) e fibras de aço no desempenho de dormentes de concreto protendido, com relação à fadiga e resistência estática. Para isto, substituíram 56% do cimento Portland CPIII pela escória GGBFS, visto que essa pesquisa foi uma continuação da pesquisa de Shin et al. (2016) e essa porcentagem de escória obteve resultados satisfatórios. Foram moldados 40 corpos de prova e estes foram divididos em moldagens com fibra de aço e sem fibra de aço. Os moldes seguiram a Norma Coreana para Ferrovias (KRS TR 0008-11 (R), 2011). Todos eles atingiram o mínimo de resistência à compressão aos 28 dias mencionados pela norma, que é de 50 MPa. Realizou-se então ensaios de fadiga e flexão estática, causando momentos positivos na região dos trilhos e momentos negativos na região central. Os resultados e comparações com o concreto convencional é apresentado a seguir na Tabela 7. Enfatizam que as fissuras formadas pela ruptura dos corpos de prova no tipo de dormente com escória e reforçado com fibras de aço foram de menores que nos outros corpos de prova, demonstrando

efeitos benéficos ao protótipo com reforço de fibras. O dormente de escória sem fibra de aço atingiu uma resistência à flexão na região dos trilhos 7,7% maior que o concreto convencional e resistência à fadiga 6,7% maior que o concreto convencional. O modelo com GGBF e fibra de aço teve o desempenho ainda melhor, com resistência à flexão 22,3% maior que o concreto convencional e resistência à fadiga 14,7% maior que o concreto convencional. Quanto ao ensaio de flexão na seção central do dormente, todos os três tipos de dormente apresentaram comportamento parecido, obtendo-se valores muito próximos.

**Tabela 7.** Resultados dos ensaios mecânicos para o concreto com GGBF.

<b>Material</b>	<b>Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)</b>	<b>Máxima carga resistida no ensaio à flexão (kN)</b>	<b>Máxima carga resistida no ensaio de fadiga (kN)</b>	<b>Máxima carga no ensaio de flexão na seção central (kN)</b>
<b>Concreto convencional</b>	60,50	479,40	501,30	106,00
<b>Concreto com escória</b>	52,50	516,50	519,70	111,80
<b>Concreto com escória e fibras de aço</b>	57,90	586,50	575,00	110,70

Fonte: Yang et al., 2017 (Adaptado).

Yoo et al. (2019) analisaram o efeito na resistência ao impacto da escória e das fibras de aço no concreto para dormentes. Os concretos foram produzidos da mesma forma que os modelos estudados por Yang et al. (2017) citados anteriormente. Os corpos de prova foram submetidos a testes de compressão de modo a avaliar se a resistência seria maior que a mínima exigida pela KTS TR 0008, que é de 50 MPa. Os três tipos de dormente, incluindo o dormente de concreto convencional, tiveram resistência à compressão superior ao valor mínimo, sendo de 60,50 MPa para o concreto convencional, 52,50 MPa para o concreto apenas com GGBF e 57,90 MPa para o concreto com GGBF e fibras de aço. Foi realizado teste de impacto segundo a BS EN 13,230-2, norma europeia para ferrovias. Os resultados foram também satisfatórios para o concreto com escória sem fibra de aço, com deflexão de 11,92 mm, 2,6% menor que do concreto convencional que obteve deflexão de 12,24 mm, e máxima carga de impacto de 1300,6 kN, 4,1% maior que o dormente de concreto convencional com máxima carga de impacto de 1249,50 kN. Para o concreto com escória reforçado com fibras de aço o desempenho foi ainda melhor em relação à deformação, obtendo uma deflexão de 10,83 mm, 11,5% menor que no dormente de concreto convencional. A máxima carga de impacto do concreto com GGBF e fibras de aço foi de 1275,50 kN, 2,08% maior que a carga máxima de impacto resistida pelo concreto convencional. Os resultados são especificados na Tabela 8.

**Tabela 8.** Resultados de resistência à compressão e impacto.

Material	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Máxima deflexão por impacto (mm)	Máxima carga de impacto (kN)
Concreto convencional	60,50	12,24	1249,50
Concreto com escória	52,50	11,92	1300,60
Concreto com escória e fibras de aço	57,90	10,83	1275,50

Fonte: Yoo et al., 2019 (Adaptado).

É importante ressaltar o benefício ambiental da utilização de escória de alto forno, que além de ser um resíduo, gera menores emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, sendo mais interessante em relação ao dormente de concreto convencional. Quanto à vida útil deste novo material, é a mesma que do concreto convencional, cerca de 50 anos, então não houveram prejuízos na substituição de cimento por escória (SHIN et al., 2016).

A Tabela 9 apresenta alguns valores encontrados para propriedades mecânicas dos materiais descritos ao longo desta seção. As pesquisas de Shin et al. (2016) não foram incluídas na tabela, visto que foram estudos iniciais para escolha de um concreto com porcentagem ideal de escória para que outros estudos fossem desenvolvidos posteriormente. A partir dessa pesquisa, foram realizados outros ensaios com a mistura que apresentou melhor desempenho para caracterização do material.

**Tabela 9.** Resumo dos estudos apresentados com dormentes de concreto alternativo.

Material	Referência	Compressão aos 28 dias (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Fadiga (kN)	Impacto (kN)	Flexão estática (kN)	Flexão dinâmica (kN)	Módulo de elasticidade (GPa)
Concreto de borracha	Hameed e Shashikala, 2016	50,00	-	-	-	-	-	-
Concreto com escória EAF e GGBF	Koh et al, 2015	72,80	-	700,00	-	705,50	542,00	-
Concreto com rejeito de mármore	Maia, 2012	46,30	6,15	-	-	-	-	40,93
Concreto com 56% de escória e fibra de aço	Yang et al, 2017; Yoo et al, 2019	57,90	-	575,00	1275,50	586,50	-	-

Fonte: Autores.

O concreto com EAF e GGBF foi o que apresentou melhor desempenho mecânico, comparando-se a resistência à compressão, a resistência à fadiga e a resistência à flexão estática. Quanto à resistência ao impacto, o concreto com 56% de escória e reforçado com fibra de aço

obteve resultado superior ao concreto convencional. O concreto de borracha também foi submetido ao teste de impacto, obtendo resistência maior que o concreto convencional também mas não foi inserido na tabela por ter sido feito com um método diferente, obtendo os resultados em unidades diferentes das demais. O aumento da resistência em relação ao concreto convencional pode ter ocorrido pela característica da borracha em absorver melhor ao impacto. O módulo de elasticidade, que é uma propriedade importante para a caracterização de dormentes, foi abordada apenas em um estudo, mostrando um déficit dessa informação nas demais pesquisas. Observa-se que nenhum dos estudos obteve todos os valores importantes para as propriedades de interesse em dormentes. Além disso, poucos estudos foram encontrados para essa linha de pesquisa de dormentes de concreto. Portanto, a gama de possibilidades para futuros estudos na área de dormentes de concreto sustentável é grande. Estudos podem ser feitos de modo a testar os materiais para esforços ainda não apresentados e também para procurar por novos materiais que ainda não foram testados.

#### 4.2.2. Polímeros Reciclados

Os polímeros se destacam como materiais que vem sendo utilizados na construção civil principalmente por terem características de alta durabilidade e uso em diversas funções. Dentre eles, o mais empregado na construção civil é o plástico, que por ser um polímero sintético está sendo constantemente melhorado. Sua reutilização é de extrema importância, visto que não é biodegradável e quando é descartado tem um tempo de decomposição de milhares de anos. Sua reciclagem ou reutilização é de grande interesse para o meio ambiente (GARCIA et al., 2018).

Para Campos (2015), o uso de plástico reciclado é uma solução inovadora para fabricação e manutenção de dormentes de ferrovias, principalmente devido à questão sustentável. Ele estudou a aplicação destes dormentes dos Aparelhos de Mudança de Via (AMVs) da via permanente. O plástico suporta elevadas tensões e apresenta maior flexibilidade que dormentes de madeira. É também impermeável e não suscetível a ataques biológicos. Pinto (2012) mostrou que a vida útil do dormente de plástico é de aproximadamente 40 anos. Este dormente pode ser feito com plástico reciclado, portanto é um material sustentável. Além disso, quando é feita a manutenção, os antigos dormentes de plástico podem seguir para reciclagem novamente ou ser reutilizados para outros fins, não produzindo resíduo sólido para o meio ambiente. Pinto (2012) apresentou também os modos de falha destes dormentes, que se dá por fraturas e trincas na região de pregação, podendo ser causada pela presença de porosidade no

dormente ocasionando a redução do módulo de elasticidade, ou fratura na região central do dormente provocada pelas condições da infraestrutura do local onde foi instalado.

Sullivan e Mack (1999) desenvolveram um compósito polimérico de plástico reciclado com a sugestão de utilização para dormentes. Segundo eles, o plástico é um material excelente pois une duas propriedades importantes: o leve peso e boa resistência mecânica, que em relação a outros materiais é um ponto favorável. Além disso, ainda pode ser modificado com a adição de outros materiais para atender diferentes critérios de desempenho na função que se deseja. Foram feitos ensaios com este compósito produzido de plástico reciclado (40 a 75% em massa), partículas de borracha de pneu (4 a 40% em massa) e mica para reforço (6 a 50% em massa). Foram preparados 4 compósitos, que serão chamados de A, B, C e D, com variações nas porcentagens de massa de cada material. Os ensaios realizados caracterizaram o dormente quanto às propriedades físicas e mecânicas, obtendo valores de módulo de elasticidade e ruptura, dureza, resistência à compressão e resistência lateral. A Tabela 10 é apresentada a seguir com os resultados dos ensaios mencionados. Como se trata de uma patente, não foi feita a comparação com materiais convencionais ou com normas

**Tabela 10.** Resultados dos ensaios para dormente de plástico.

CP	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo de ruptura (GPa)	Resistência lateral (kN)	Dureza (kN)	Compressão (MPa)
A	1,13	8,41	-	-	-
B	0,99	9,72	12,05	15,60	87,20
C	0,99	9,03	10,07	16,49	91,30
D	1,05	7,86	-	-	-
<b>Média</b>	1,04	8,76	11,06	16,04	89,25

Fonte: Sullivan e Mack, 1999 (Adaptado).

Candian (2007) estudou sobre Polietileno de Alta Densidade (PEAD) reciclado para uso em elementos estruturais. O modelo foi desenvolvido com a utilização de fragmentos PEAD reciclado, nas cores branco e verde. Foram realizados ensaios de tração, compressão, flexão estática e impacto com corpos de prova de PEAD verde e PEAD branco fabricados por extrusão e corpos de prova de PEAD sem reciclagem. Os ensaios seguiram as normas da ASTM - *American Society for Testing and Materials*. Os resultados dos ensaios mencionados anteriormente são apresentados a seguir na Tabela 11. Para comparação, foram utilizados valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto com resistência à

compressão característica ( $f_{ck}$ ) de 25 MPa e da madeira da espécie *Eucalyptus Grandis*, cujos valores são apresentados na Tabela 12.

**Tabela 11.** Resultados dos ensaios mecânicos para PEAD reciclado.

Material	Resistência à tração (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Resistência de impacto (J/m)
PEAD Branco	21,85	654	26,2	805	17,64	137,3
PEAD Verde	22,24	438	28,72	245	18,73	137,2
PEAD puro	28	860	-	-	14-20	140

Fonte: Candian, 2007 (Adaptado).

**Tabela 12.** Comparação com concreto C25 e madeira.

Material	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
Concreto	25,00	23800,00
<i>Eucalyptus Grandis</i>	40,30	12813,00
PEAD Branco	26,20	805,00
PEAD Verde	28,72	719,00

Fonte: Candian, 2007 (Adaptado).

O dormente de PEAD reciclado apresentou baixo módulo de elasticidade comparado com a madeira e o concreto com  $f_{ck}$  de 25 MPa. Essa propriedade é importante pois influencia diretamente na rigidez do elemento estrutural. A resistência à compressão do PEAD branco foi 4,8% maior e do PEAD verde foi 14,9% maior em comparação ao concreto. Em relação à madeira, o PEAD branco apresentou resistência à compressão 35% menor, enquanto o PEAD verde obteve resistência 29% menor que a madeira. Isso pode ter ocorrido devido a problemas na extrusão do corpo de prova (CP), visto que os CPs apresentaram defeitos, como a formação de bolhas. Além disso, o módulo de elasticidade foi muito menor que o do concreto e da madeira. Candian (2007) apresenta a proposta de reforço do material com a utilização de fibras com elevado módulo de elasticidade e resistência mecânica para melhorar seu desempenho.

Muitas empresas já estão desenvolvendo produtos de plásticos reciclado para superestrutura ferroviária. Essas empresas utilizam PEAD reciclado e moldam com o sistema de extrusão com o objetivo de evitar vazios no interior do dormente. Mas o módulo de elasticidade encontrado para estes produtos é menor que o módulo de elasticidade dos materiais convencionais, como madeira e concreto, assim como no estudo feito por Candian (2007). A solução proposta para este problema foi a adição de fibras de vidro, de forma a melhorar o desempenho mecânico deste tipo de material, tornando viável tecnicamente sua utilização como dormente (PARENTE e PINHEIRO, 2008).

Figueiredo, Martuscelli e Catañon (2016) fizeram uma simulação numérica do uso de um compósito cerâmico-polimérico para dormentes. Esse compósito foi desenvolvido com cimento, resina epóxi e resíduos de borracha de pneu em 10% em massa. Suas propriedades mecânicas foram obtidas por Martuscelli (2013). Foram realizados ensaios de resistência à tração, resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade. O compósito apresentou resistência à compressão de 45,32 MPa, resistência à tração de 15,93 MPa, resistência à flexão de 24,97 MPa e módulo de elasticidade com valor de 5,40 GPa. A partir dos valores encontrados, foi desenvolvida a geometria de um dormente pelo software ANSYS 14.0, no qual foi feita uma análise aplicando-se uma carga de 177kN distribuída ao longo da superfície do patim, parte do trilho que estabelece o contato com o dormente e distribui as cargas. Com a análise, foi possível perceber que o compósito apresentou coeficiente de segurança em relação à tração de 3,27, tornando-o viável para o uso como dormente. Este estudo é interessante à medida que muitos materiais alternativos para elementos estruturais estão sendo desenvolvidos e estudados, mas ainda não foram testados para o uso em dormentes, especificamente. A análise por um software é uma linha interessante de pesquisa para que depois esses materiais sejam ensaiados em laboratório caso tenham um bom desempenho após análise computadorizada.

Na Tabela 13 é apresentado um resumo de todos os estudos mencionados com os respectivos resultados de ensaios de resistência mecânica feitos em cada pesquisa.

**Tabela 13.** Resumo de resultados para ensaios mecânicos em dormentes de polímeros.

Material	Referência	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de ruptura (MPa)
PEAD Branco	Candian, 2007	26,20	805,00	17,64	21,85	-
PEAD Verde	Candian, 2007	28,72	719,00	18,73	22,24	-
Plástico reciclado e borracha	Sullivan e Mack, 1999	89,25	1040,00	-	-	8,76
Compósito cerâmico-polimérico	Figueiredo, Martuscelli e Catañon (2016)	45,32	5400,00	24,97	15,93	-

Fonte: Autores.

Dentre os materiais poliméricos, o PEAD reciclado com adição de fragmentos de borracha foi o que apresentou maior resistência à compressão, com uma diferença de quase 44 MPa para o compósito cerâmico-polimérico que teve a segunda maior resistência à compressão. Para o módulo de elasticidade, o melhor material estudado foi o compósito cerâmico-polimérico, seguido do plástico reciclado com fragmentos de borracha. O compósito cerâmico-polimérico teve melhor desempenho também no ensaio de resistência à flexão, mas no ensaio à tração foi o que apresentou pior resultado. Os dormentes desenvolvidos por Candian (2007) de PEAD reciclado foram os que obtiveram maiores valores de resistência à tração. Quanto ao módulo de ruptura, apenas um dos estudos apresentou este ensaio, não sendo possível fazer a comparação entre os materiais poliméricos apresentados.

## 5. LASTRO

O lastro é o elemento da superestrutura ferroviária disposto entre os dormentes e o sublastro. O lastro deve ser capaz de absorver os esforços transmitidos pelos dormentes e transmiti-los ao sublastro de forma conveniente, proporcionando à plataforma, menor taxa de trabalho. Deve fornecer suporte de certa forma elástico, capaz de atenuar as vibrações que são causadas pela passagem do material rodante, suprir as irregularidades da plataforma, fornecendo uma superfície regular para o apoio dos dormentes e trilhos. Impedir que os dormentes se desloquem e facilitar a drenagem da superestrutura. A altura do lastro de uma ferrovia é calculada a partir da análise de como é a distribuição das pressões transmitidas pelos dormentes e da pressão admissível do solo (BRINA, 1979).

Segundo Brina (1979), as especificações para o lastro são as seguintes:

- Resistência à ruptura: 700 kg/cm<sup>2</sup>;
- Solubilidade: não deve ser solúvel, se for é considerada imprópria;
- Absorção: aumento do peso de uma amostra de 230 gramas mergulhada em água não deve ultrapassar 8 g/cm<sup>3</sup>;
- A quantidade de substâncias nocivas não deve ultrapassar 1%;
- Granulometria: dimensões entre 2 a 6 cm;
- Resistência à abrasão Los Angeles: máximo de 35%.

Os materiais convencionais utilizados para lastro são solo, areia, cascalho e pedra britada.

### **5.1. Materiais Convencionais**

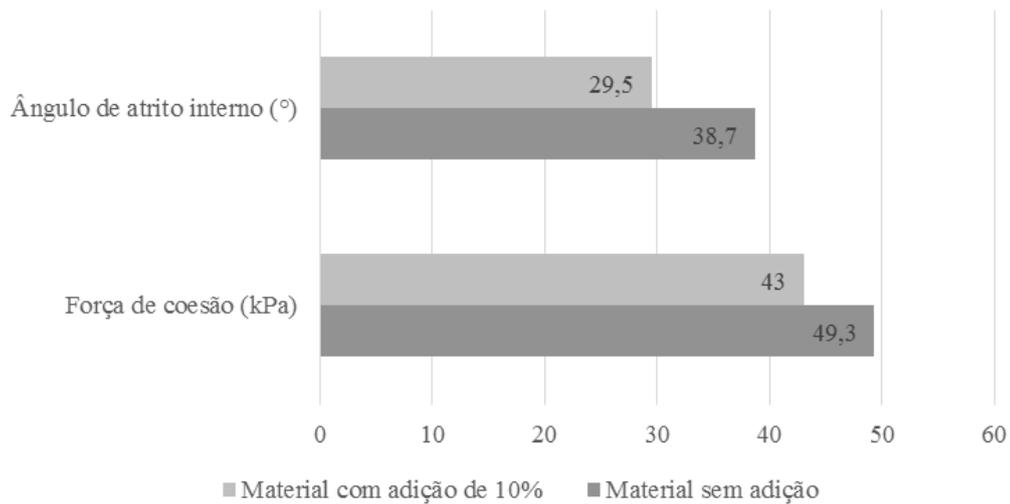
O solo é o material convencional utilizado para lastro com menor custo mas pode sofrer desnivelamento a medida que fica saturada com água e essa é a causa mais frequente de descarrilamentos. Já a areia é pouco compressível e é permeável, portanto não ocorre a saturação. Porém, produz poeira que pode ficar na região dos trilhos e causar desgaste na roda dos veículos. O cascalho é um lastro de ótima qualidade, sendo ainda melhor quando quebrado por ficar com arestas vivas. Mas o melhor material convencional é a pedra britada, com resistência elevada, permeável e resistente a agentes atmosféricos permite um nivelamento excelente para o lastro (BRINA, 1979).

Porém, esses materiais são recursos naturais que podem se tornar escassos, por isso a busca por alternativas sustentáveis é cada vez maior. A utilização de materiais alternativos diminui a demanda de jazidas naturais que, muitas vezes possuem sua ocorrência em locais distantes dos empreendimentos que necessitam desses recursos naturais (SOUSA, 2007).

#### **5.1.1. Partículas de Borracha**

No estudo realizado por (GONG et al., 2019) foram realizados testes laboratoriais de cisalhamento direto e simulações através do Método de Elementos Discretos (MED) com material para lastro ferroviário misturado com diferentes porcentagens de partículas de borracha de pneus. Para o estudo também foi utilizada pedra de granito, material comum para lastro. As partículas de borracha foram incorporadas manualmente ao material de lastro nas porcentagens 5 e 10%, em volume. Foram realizados testes laboratoriais com intuito de determinar, a partir do critério de Mohr-Coulomb, a força de coesão e o ângulo de atrito interno do material de lastro (pedra de granito) sem adição de partículas de borracha e com adição de 10% de partículas de borracha. Os resultados obtidos nesses testes são mostrados no gráfico apresentado na Figura 3.

**Figura 3.** Ângulo de atrito interno e Força de coesão: Testes laboratoriais.

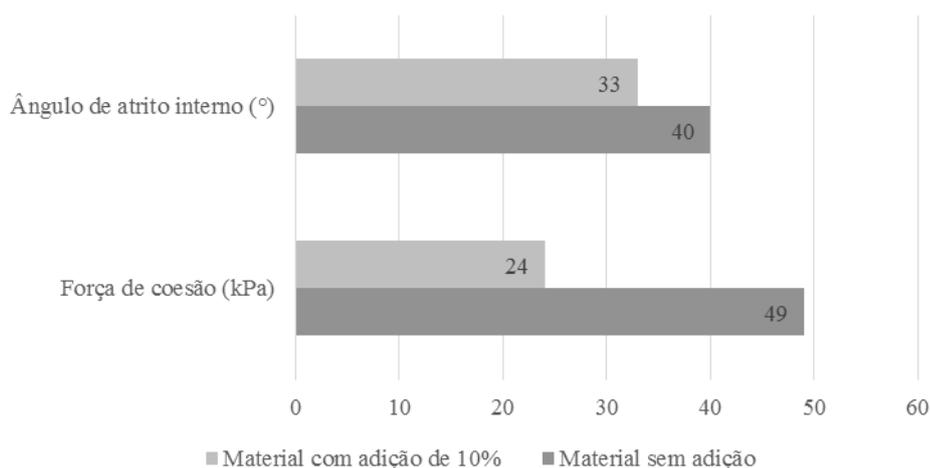


Fonte: Gong et al., 2019 (Adaptado).

Como é possível observar na Figura 3, nos testes laboratoriais, a força de coesão encontrada no material sem adição das partículas de borracha foi de 49,3 kPa enquanto para o material com adição de 10% de partículas de borracha a força de coesão encontrada foi de 43 kPa, caracterizando uma redução de 6,3 kPa. O ângulo de atrito interno obtido para o material sem adição de borracha foi 38,7°, ao passo que o ângulo de atrito observado no material com adição de 10% de partículas de borracha foi de 29,5°, ou seja, 9,2° menor que o ângulo de atrito interno observado no material sem adição de partículas de borracha. Essa redução no ângulo de atrito interno e na força de coesão garantem uma melhoria nas propriedades do material de lastro. Quanto maiores esses parâmetros, maiores as forças de contato e conseqüentemente, maior a probabilidade de haver a quebra desses materiais, gerando partículas menores que podem preencher os vazios existentes no lastro, que comprometem a drenagem da via.

Os valores obtidos através do MED para o ângulo de atrito interno e a força de coesão, estão apresentados na Figura 4.

**Figura 4.** Ângulo de atrito interno e força de coesão: MED.



Fonte: Gong et al., 2019 (Adaptado).

Para os testes MED, conforme Figura 4, a força de coesão e o ângulo de atrito interno do material também apresentaram reduções. O material sem adição de partículas de borracha apresentou força de coesão de 49 kPa e o material com adição de 10% de partículas de borracha apresentou força de coesão de 24 kPa, o que caracteriza uma redução de 25kPa, redução maior que a apresentada pelos testes laboratoriais. Já ângulo de atrito interno para o material sem adição foi de 40° para 33°, ou seja, houve uma redução de 7°, que foi menor que a redução apresentada pelos testes laboratoriais. Esses valores confirmam os resultados obtidos pelos testes laboratoriais e indicam que a adição dessas partículas de borracha podem reduzir a degradação do material e aumentar a vida útil da plataforma (GONG et al., 2019).

Guo et al. (2019) estudaram o efeito de fragmentos de resíduos de borracha em lastro para redução de sua degradação. Eles utilizaram três tipos de lastro (rochas primárias de granito, arenito e vulcânica) e porcentagens de 0, 10, 20 e 30% em massa de fragmentos de borracha com tamanhos entre 3 e 25 mm e módulo de elasticidade de 8 MPa, para sua pesquisa. O tamanho das rochas foram de 30 a 45 mm, já o tamanho dos fragmentos de borracha foi pensado de forma que não excedesse 25 mm para que a interação borracha-lastro não fosse prejudicada. As amostras foram submetidas a ensaio de Abrasão Los Angeles e testes de quebra do material para avaliar qual a influência das partículas de borracha. Para o ensaio de Abrasão Los Angeles, o resultado obtido mostrou que as amostras com fragmentos de borracha com porcentagem de 10% em massa tiveram maior resistência à abrasão, mas quando a porcentagem de borracha aumenta, seu efeito não é diretamente proporcional e não é significativo. Os resultados também não foram satisfatórios para o teste de quebra visto que a borracha protegeu o lastro, que se

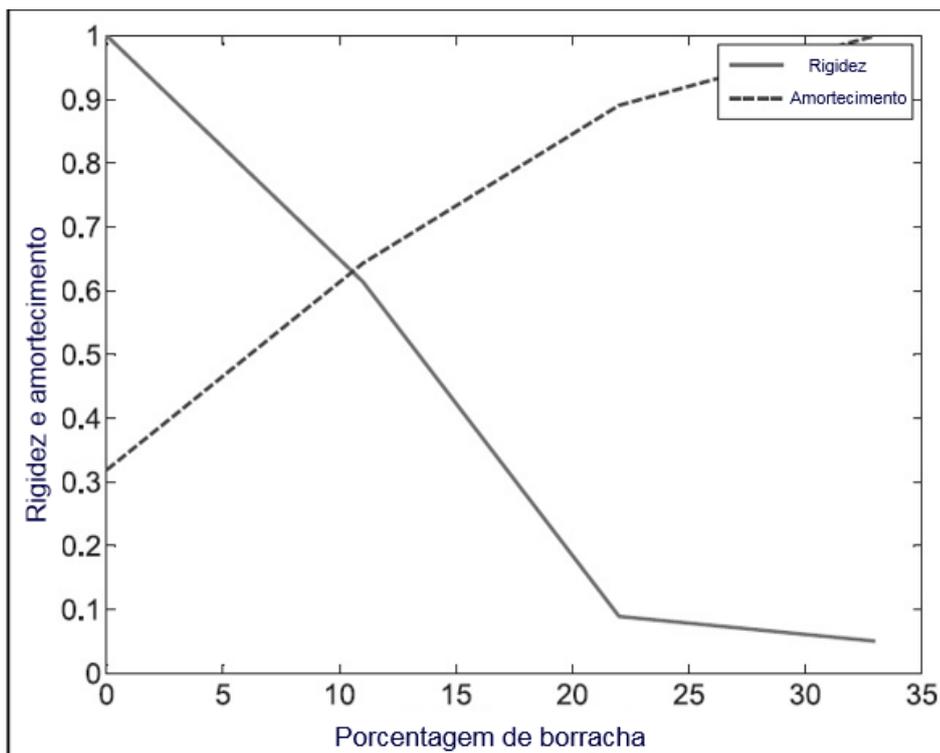
quebra inicialmente nos cantos, no primeiro estágio do ensaio de quebra mas a longo prazo não teve influência para que o material resistisse mais que o lastro sem adição de borracha.

Com a intenção de evitar problemas devido a elevada rigidez nas ferrovias, foi proposto por (ESMAEILI et al., 2016) avaliar o comportamento do lastro de dolomita convencional misturado com 11, 22 e 33% em volume, de partículas de borracha de pneus inservíveis. A gradação das partículas de borracha seguiu a mesma gradação do material de lastro convencional e foram obtidas a partir da trituração de pneus de caminhões sem cinta de aço.

Para a realização dos testes laboratoriais, uma câmara de aço de dimensões 1,2 x 1,2 x 1 m foi preenchida com os materiais de lastros em estudo e uma placa de aço foi colocada no centro da câmara sobre o material. Foram colocados na câmara 3 acelerômetros, sendo um posicionado verticalmente na placa próximo à ponta do agitador e os outros dois posicionados horizontalmente no corpo da câmara para medir a aceleração do sistema (ESMAEILI et al., 2016).

Os resultados experimentais mostraram que após a adição das partículas de borracha, a resposta dinâmica do sistema diminuiu assim como as frequências de ressonância. Com a adição de 11% de partículas, o amortecimento do lastro praticamente dobrou e a rigidez do sistema foi reduzida. Com adição de 22 e 33% foi observado que a rigidez do sistema foi mais afetada do que o amortecimento, por isso, para uso prático, foi proposto como valor ótimo de adição de partículas de borracha seria em torno 10% do volume de agregado (ESMAEILI et al., 2016). A Figura 5 mostra o comportamento do sistema com relação à rigidez e ao amortecimento conforme a porcentagem de partículas de borracha cresce.

**Figura 5.** Comportamento do sistema com adição de partículas de borracha



Fonte: Esmaeili et al., 2016 (Adaptado).

A adição de partículas de borracha no material de lastro ferroviário tem mostrado resultados satisfatórios, além de utilizar um resíduo ambientalmente problemático, essas partículas melhoram propriedades mecânicas importantes ao lastro. O aumento no amortecimento do lastro possibilita que as cargas que chegam ao subleito sejam menores, evitando que hajam deformações excessivas nessa camada.

### 5.1.2. Escória

Com o intuito de estudar as características das escórias utilizadas em camadas de lastro ferroviário, Sousa (2007) e Oliveira (2013) realizaram estudos com amostras de escória. As amostras utilizadas por Sousa (2007) tratavam-se de amostras de escória de aciaria provenientes do Processo Linz – Donawitz (LD) utilizadas como camada de lastro na Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM) fornecidas pela Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). A Escória 1 trata-se de escória fornecida pela USIMINAS – Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais e a Escória 2 fornecida pela Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST). Ambas as amostras passaram por processos semelhantes de resfriamento e cristalização antes de serem utilizadas pela CVRD

como lastro ferroviário. Já a amostra utilizada por Oliveira (2013), Escória 3, trata-se de escória de ferro de silício-manganês obtida pela siderúrgica de Ouro Preto. Para os dois estudos (SOUSA, 2007; OLIVEIRA, 2013), as amostras passaram por procedimentos de separação e caracterização, para posterior ensaio de resistividade elétrica.

Os resultados obtidos pela caracterização física das amostras são apresentados na Tabela 14.

**Tabela 14.** Caracterização física de amostras de escória.

Material	Índice de Contaminação (FI)	Abrasão Los Angeles (%)	Resistência ao choque (%)	Massa específica aparente (kN/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Referência
Escória 1	1,20	11,20	10,20	35,80	0,99	2,66	SOUSA, 2007
Escória 2	11,20	11,80	16,10	33,90	1,96	4,55	
Escória 3	1,50	13,20	9,97	29,03	1,01	2,00	OLIVEIRA, 2013
<b>NBR 5564</b>	-	Máxima 40%	-	Mínima 25	Máxima 0,8%	Máxima 1,5%	NBR 5564

Fonte: Sousa, 2007; Oliveira, 2013 (Adaptado).

Como pode ser observado na Tabela 14, todas as amostras apresentam certo índice de contaminação, porém, a Escória 2 possui um valor que destoa muito dos demais, sendo um valor bem elevado. Esse índice de contaminação avalia a contaminação granulométrica do material, já que a presença de partículas finas no material pode prejudicar o desempenho do lastro, diminuindo sua capacidade de drenagem e aumentando os recalques. Quanto maior o Índice de Contaminação, mais problemas a utilização desse material pode acarretar à via. As três amostras de escória analisadas apresentaram valores de Abrasão Los Angeles inferiores ao valor normativo máximo, o que significa que o material possui boa resistência à abrasão. Quando são utilizados materiais com elevado valor de abrasão, a produção do pó que resulta do desgaste desses materiais pode se tornar um material contaminante.

A massa específica aparente obtida pelas três amostras satisfaz o valor normativo, porém, a porosidade aparente e a absorção de água apresentam valores superiores ao máximo apresentado pela NBR 5564 (1991).

Para determinar a resistividade elétrica do lastro, Sousa (2007) realizou ensaios de resistividade em um simulador em escala real desenvolvido, em parceria com a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). A resistividade

elétrica foi determinada de duas formas distintas através do aparelho megôhmetro. Na primeira forma, foi obtida entre trilhos e eletrodos, para dormentes de madeira; Na segunda forma, foi obtida também entre trilhos e eletrodos, mas para dormentes de aço. Além disso, as condições climáticas as quais os dados foram obtidos variavam de clima seco para clima chuvoso (SOUSA, 2007).

Oliveira (2013) também realizou testes de campo para determinar a resistividade elétrica da Escória 3. Para tais testes, utilizou-se simulador de resistividade elétrica construído na estação ferroviária Mário de Carvalho no município do Timóteo no Estado de Minas Gerais. O simulador baseou-se no simulador citado anteriormente no estudo realizado por (SOUSA, 2007). Os valores de resistividade elétrica foram determinados por 147 dias, sendo que nos 20 primeiros dias, o clima estava seco e nos demais dias, chuvoso.

Os dados obtidos pelos dois estudos foram agrupados na Tabela 15. Os valores apresentados para clima seco da Escória 3 tratam-se de uma média feita entre os valores encontrados nos 20 primeiros dias e os valores para clima chuvoso correspondem a uma média feita com base nos valores de resistividade elétrica para os demais dias.

**Tabela 15.** Resistividade elétrica para amostras de escória.

Material	Tipo de montagem	Resistividade ( $\Omega\text{m}$ )				Referência	
		Dormentes de madeira		Dormentes de aço			
		Clima Seco	Clima Chuvoso	Clima Seco	Clima Chuvoso		
Escória 1	Entre eletrodos	488,89	133,33	666,67	222,22	SOUZA, 2007	
	Entre trilhos	200	100	2800	1300		
Escória 2	Entre eletrodos	577,78	177,78	533,33	266,67		
	Entre trilhos	200	100	2700	1000		
Escória 3	Entre eletrodos	4170,18	1101,65	10509,15	759,91		OLIVEIRA, 2013
	Entre trilhos	2016,54	716,8	7511,76	3297,79		

Fonte: Sousa, 2007 e Oliveira, 2013 (Adaptado).

Conforme manual da AREA – *American Railway Engineering Association* (AREA, 1991), o valor mínimo para resistividade elétrica do material de lastro ferroviário é de 300  $\Omega\text{m}$ . Analisando os dormentes de madeira, a Escória 1 e 2 apresentaram resistividade elétrica de 200  $\Omega\text{m}$  e 100  $\Omega\text{m}$  para clima seco e chuvoso, respectivamente. Em clima chuvoso, a Escória 1, apresentou, entre eletrodos, resistividade elétrica de 133,33  $\Omega\text{m}$  e a Escória 2, 177,78  $\Omega\text{m}$ . Esses valores estão abaixo dos 300  $\Omega\text{m}$ , valor mínimo normativo. Não foram observados na Escória 3 valores inferiores ao normativo.

Em ferrovias que possuem sistema automático de bloqueio ou circuito de sinalização de via, a tensão elétrica que passa pelos trilhos é utilizada para detectar a presença do trem na via. Quanto maior o valor da resistividade elétrica do material, maior a facilidade de condução de corrente elétrica através desse material (OLIVEIRA, 2013).

Os baixos valores de resistividade elétrica apresentados pelos materiais de lastro, relacionados a ocorrência de chuvas, pode ocasionar a perda da corrente elétrica circulante nos trilhos, influenciando o funcionamento do circuito de sinalização (SOUSA, 2007).

Segundo Sousa (2007), os materiais naturais convencionais utilizados nas camadas de lastro ferroviário, como o gnaiss, por exemplo, possuem resistividade elétrica suficiente para evitar perdas significativas de condução de corrente elétrica, mas uma das vantagens do uso da escória provém do interesse das siderúrgicas de que esse resíduo seja utilizado, viabilizando financeiramente a sua utilização. Além disso, a utilização desse resíduo preserva jazidas naturais cada vez mais escassas, conforme mencionado acima.

Observando a Tabela 15, é possível observar que a média de resultados obtidos para a Escória 3 estão todos acima do valor normativo de 300  $\Omega\text{m}$ , o que possibilita a utilização desse resíduo como lastro ferroviário.

Apesar dos valores de resistividade elétrica das escórias apresentadas, em sua maior parte, serem maiores que o valor normativo mínimo, Oliveira (2013) destaca que, com o passar do tempo, o lastro sofre degradação devido a passagem dos veículos pesados, o que gera partículas finas na via e que podem, em grande quantidade, serem cimentadas na presença de água e de outros materiais. Esse material cimentado pode conduzir corrente elétrica e gerar um falso sinal de ocupação na via, interrompendo o tráfego ferroviário e gerando outros inconvenientes. Por isso, é importante a caracterização física da escória antes da sua utilização como lastro, verificando suas propriedades granulométricas, sua resistividade e também a resistividade do pó de escória que pode ser gerado. Sousa (2007) enfatiza que os problemas que ocorrem nas vias onde a escória é utilizada como lastro, podem ser causados pela falta de caracterização física desse resíduo antes de sua utilização.

### 5.1.3. Resíduo de Construção e Demolição

Resíduos de Construção e Demolição (RCD) foram coletados para que fosse estudada sua resistência à fadiga, objetivando sua utilização como lastro ferroviário. Os tipos de RCD

testados foram tijolos quebrados e agregados de concreto reciclado. As características geotécnicas dos RCDs foram avaliadas para garantir a compatibilidade destes materiais com recomendações para lastro. Para estabilizar quimicamente o resíduo foi utilizada escória, um material rico em cálcio, sílica e alumina. Adicionou-se 10% em massa de escória à cada amostra dos RCDs. Antes do ensaio de fadiga, foi feita a caracterização física dos materiais. Dentre os ensaios, foi feito o Ensaio de Abrasão Los Angeles segundo a ASTM C131 (2006), para o qual o resultado foi de 31,1% para agregados de concreto reciclado e 34,9% para tijolos quebrados. Posteriormente, foi encontrado o módulo de ruptura das amostras, tendo resultado de 1,68 MPa para os tijolos quebrados e 1,90 MPa para os agregados de concreto reciclado. Finalmente, foi realizado o ensaio de resistência à fadiga, tendo o material de agregados de concreto reciclado com melhor desempenho, com resistência de 1748 MPa, enquanto o tijolo triturado obteve resistência de 1529 MPa. Portanto, o lastro de agregado de concreto reciclado obteve melhor desempenho mecânico nos dois testes mencionados, além de melhor resistência à abrasão, característica importante para o material de lastro, visto que um material com pior resistência à abrasão pode causar problemas como geração de poeira que pode ser depositada nos trilhos (MOHAMMADINIA et al., 2019).

## 6. SUBLASTRO

O sublastro é a camada colocada sob o lastro e tem como principais funções: absorver as cargas transmitidas pelo lastro e transferi-las de forma adequada ao terreno subjacente aumentando sua capacidade de suporte, permitindo redução na espessura da camada do lastro e conseqüentemente, barateando a implantação da ferrovia; evitar que o material do lastro penetre na plataforma; aumentar a resistência do leito à erosão; melhorar a drenagem da via e permitir certa elasticidade ao apoio do lastro (BRINA, 1979). Além disso, a adição dessa camada melhora consideravelmente o comportamento do pavimento (RANGEL, ARAGÃO e MOTTA, 2015).

Segundo De Paiva et al. (2018), a espessura da camada do sublastro varia de 10 a 30 cm, sendo 15 cm a espessura mais habitual nas ferrovias brasileiras, dependendo da qualidade do material do subleito, espessura do lastro e características do tráfego ferroviário.

Já Rangel, Aragão e Motta (2015), afirmam que quando utilizado material granular, a espessura do sublastro varia de 20 a 30 cm, dependendo do nível de tensão máximo requerido no subleito e das propriedades dos materiais componentes das camadas da superestrutura ferroviária.

Dentre os diferentes tipos de danos existentes no sistema ferroviário, podemos identificar a emissão de ruídos, a propagação de ondas através do solo e a degradação da geometria da via devido ao assentamento de camadas granulares (NIELSEN et al., 2010).

Além disso, a grande vibração gerada pelas linhas ferroviárias têm sido um problema principalmente quando essas linhas passam próximas a centros urbanos, por causarem desconforto à população e possíveis danos às edificações no entorno da ferrovia (SÁNCHEZ, NAVARRO e GÁMEZ, 2014).

Os materiais convencionais mais comuns utilizados para sublastro são lateritas, cascalhos e solos arenosos.

### 6.1. Materiais Convencionais

Em países de clima temperado o sublastro é composto basicamente de material grosso, sendo mais de 50% retido na peneira com abertura da malha de 0,075 mm, mas com

granulometria inferior à do lastro. Trata-se de material natural selecionado previamente podendo inclusive ser utilizados diferentes tipos de solo desde que atendam as especificações para utilização como camada de sublastro (DELGADO, 2012).

De acordo com a Instrução de Serviço Ferroviário (ISF – 212, 2015) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), os materiais a serem empregados no sublastro podem ser lateritas, cascalhos, solos arenosos, ou seja, materiais obtidos “in natura” ou podem ser obtidos pela mistura de dois ou mais materiais, desde que obedecem as características específicas para tal finalidade.

As características necessárias ao material de sublastro, segundo a ISF 212 (2015) são:

- Índice de Suporte de Califórnia (ISC) mínimo de 20;
- Limite de liquidez (LL) inferior ou igual à 25%;
- Índice de Plasticidade (IP) inferior ou igual à 6%
- Índice de Grupo (IG) igual a zero;
- Expansão máxima de 1%;
- No caso de solos lateríticos será admitida expansão máxima de 0,5% no ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), Limite de Liquidez (LL) inferior ou igual à 40% e Índice de Plasticidade (IP) inferior ou igual à 15%.

Os materiais convencionais são de origem natural, o que pode causar o esgotamento das reservas naturais. Por isso, é importante que sejam desenvolvidos materiais não convencionais, minimizando os riscos de escassez dos recursos naturais.

## **6.2. Materiais Não Convencionais**

### **6.2.1. Pneu de Borracha**

Com intuito de reduzir problemas como desgaste da geometria da via, emissão de ruídos e vibrações, pesquisas estão sendo realizadas para incorporação de partículas de pneus de borracha inservíveis nas camadas de sublastro. A adição dessas partículas visa, além de acrescentar benefícios a linha ferroviária, resolver o problema ambiental gerado pelo descarte de pneus de borracha, já que estes possuem elevado tempo de decomposição e podem contaminar o solo através da liberação de líquidos e gases, quando expostos ao tempo (SIGNES

et al., 2016; SHARMA et al., 2000; ESMAEILI et al., 2015), além de outros problemas mencionados anteriormente.

Para avaliar as propriedades de misturas de agregado com partículas de borrachas proveniente de recauchutagem de pneus, em uma pesquisa realizada por Signes et al. (2016) foram coletados agregados de natureza calcária provenientes de uma pedreira no Sudeste da Espanha, material comumente utilizado em camadas de sublastro ferroviário da região, e adicionado a esse material diferentes porcentagens de partículas de borracha.

As amostras foram preparadas com adição de partículas de borracha nas porcentagens 1, 2,5 e 5,0% em termos de peso. Em todas as amostras foram utilizados somente o material de origem calcária, as partículas de borracha e água. Após compactação por Proctor Modificado segundo a norma (ASTM D1557, 2012), as amostras foram submetidas a ensaios triaxiais de cargas cíclicas de acordo com a norma (AASHTO T307-99, 2003) para obtenção de seu Módulo de Resiliência (SIGNES et al., 2016).

A amostra sem adição de partículas de borracha apresentou módulo resiliente de 249,6 MPa, enquanto o material com adição de 5% apresentou módulo de resiliência de 92,8 MPa, mostrando que a adição de partículas de borracha tende a diminuir o módulo de resiliência do material. É importante ressaltar que são exigidos valores mínimos de módulos de resiliência para materiais utilizados em camadas de suporte com intuito de evitar deformações plásticas e instabilidade no material. Por isso, a adição dessas partículas deve ser limitada. Partindo de uma exigência de 100 MPa, como valor mínimo para o módulo de resiliência, a adição das partículas de borracha se limita a 5%, o que evita ocorrências de deformações plásticas e instabilidade no material (SIGNES et al., 2016).

Com intuito de avaliar a atenuação de vibrações em materiais com adição de partículas de borracha, foram realizados testes laboratoriais e testes de campo por Signes et al. (2017). Como não existem testes laboratoriais padronizados para medir o comportamento de misturas granulares com relação à vibração, foram realizados testes laboratoriais que seguiam procedimentos apresentados por trabalhos publicados anteriormente (ASTM C215, 2002; GUIMOND-BARRET et al., 2013) e teste de ressonância de solos apresentados em (Spanish Ministry of Public Works, 2006). Os resultados dos testes laboratoriais mostraram que a adição de 5% de partículas de borracha na mistura de agregados reduz a amplitude de vibração no material e aumenta o seu amortecimento. A frequência de ressonância do material apresentou

redução de 10276 Hz para 8015 Hz e o pico de aceleração do material foi reduzido de 2,71 m/s<sup>2</sup> para 0,26 m/s<sup>2</sup>.

O aumento do amortecimento na camada do sublastro possibilita que sejam transferidas ao subleito, cargas em menores proporções, diminuindo a possibilidade de grandes desgastes no subleito, que é o próprio terreno de fundação da ferrovia e faz parte de sua infraestrutura. A diminuição da propagação das vibrações é positiva principalmente quando existem edificações de centros urbanos localizados próximos às ferrovias, pois essa vibração gerada pela passagem dos trens causa grande desconforto aos moradores, como já citado anteriormente.

Os testes de campo foram realizados com intuito de avaliar melhor o comportamento das misturas quando submetidas a condições mais aproximadas às condições reais de uma ferrovia. Para isso, uma plataforma ferroviária experimental com 10 m x 10 m foi criada, sendo colocado sobre ela, 35 cm de agregado para representar a plataforma ferroviária, sobre a qual foi adicionada uma camada de 30 cm para representar o sublastro. A camada de sublastro foi dividida em quatro seções, cada seção com um material diferente, sendo esses: material sem adição de partículas de borracha e material com adição de 1; 2,5 e 5% em massa de partículas de borracha. Em cada seção da camada de sublastro foram colocados acelerômetros piezoelétricos uniaxiais e foi utilizado como fonte de excitação um martelo pneumático. (SIGNES et al., 2017)

Os resultados apresentados pelos testes de campo comprovam o potencial de redução do pico médio de aceleração de materiais com adição de partículas de borracha. Apesar da anisotropia do material foi possível observar redução de mais da metade no valor do pico de aceleração do material com adição de 5% de partículas de borracha comparado ao material com adição de 1% (SIGNES et al., 2017).

A Tabela 16 agrupa os principais resultados obtidos nos diferentes ensaios com amostras de material granular com adição de 5% em peso de partículas de borracha oriundas de pneus inservíveis.

**Tabela 16.** Propriedades mecânicas para sublastro com partículas de borracha.

Material	Módulo de Resiliência, Mr (MPa)	Tensão Permanente, $\epsilon_p$ (%)	Tensão Resiliente, $\epsilon_r$ (%)	$f_0$ (Hz)	Relação de amortecimento ( $\xi$ )	Aceleração máxima (m/s <sup>2</sup> )	Referência
Sublastro	249,600	0,233	0,042	10476	0,040	2,710	SIGNES, FERNÁNDEZ e ROCA, et al. 2016
Mistura 5%	92,800	0,750	0,103	8015	0,119	0,260	SIGNES, FERNÁNDEZ e PERALLÓN, et al. 2017

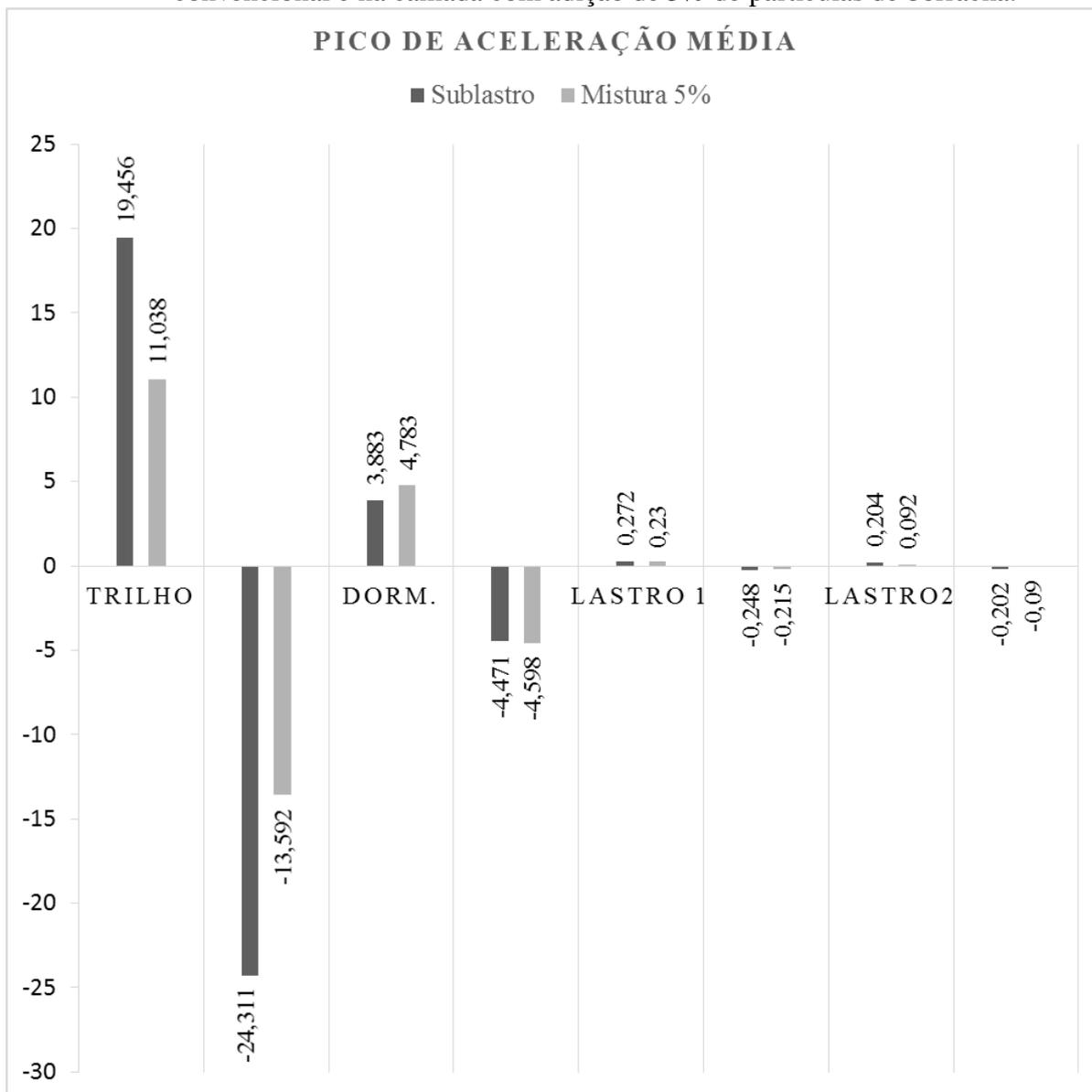
Como é possível observar na Tabela 16, a adição de partículas de borracha alterou significativamente os parâmetros avaliados. O Módulo de Resiliência teve redução de 62,8% com relação ao sublastro convencional, enquanto a Tensão Permanente aumentou aproximadamente 1% e a Tensão Resiliente 0,061%. A frequência de ressonância teve uma queda de mais de 2,4kHz, a relação de amortecimento aumentou e a aceleração máxima teve redução de 90%. Esses resultados mostram que a capacidade do sublastro em absorver as cargas advindas do lastro aumenta com a adição das partículas de borracha, algo importante pois além de transmitir menor carga para o solo das camadas inferiores da estrutura ferroviária, pode garantir maior tempo de vida útil da ferrovia.

A adição de 2,5% e 5% de partículas de borrachas de pneus inservíveis no material granular também foram testadas em uma plataforma ferroviária real com verdadeiras condições de tráfego, situada no Sul da Espanha. As misturas foram usadas como sublastro em uma faixa de 90 m da linha férrea construída como parte da renovação da estação de triagem na estação de São Roque. A faixa construída foi dividida em três seções de 30 m cada, sendo uma de material de referência para sublastro, outra com material de sublastro com adição de 2,5% e a última com adição de 5% das partículas de borracha. Além das faixas adicionais, outro trecho também foi utilizado para monitoração como parâmetro de referência. A monitoração das faixas deu-se por acelerômetros que mediam a vibração transmitida para o ambiente pela passagem das locomotivas e os resultados obtidos em cada faixa foram comparados entre si e com os resultados obtidos pela faixa de referência adicional (FERNÁNDEZ et al., 2018).

As quatro faixas foram individualmente monitoradas por quatro acelerômetros posicionados em locais diferentes, sendo um no trilho, outro no dormente e os outros dois no lastro, sendo um em cada extremidade lateral (FERNÁNDEZ et al., 2018).

A Figura 6 agrupa os resultados obtidos pelos quatro acelerômetros na camada com sublastro convencional e na camada com adição de 5% de partículas de borracha.

**Figura 6.** Resultados obtidos pelos quatro acelerômetros na camada com sublastro convencional e na camada com adição de 5% de partículas de borracha.



Fonte: Fernández et al., 2018 (Adaptado).

Foi observado que a adição de borracha reduz o pico de vibração transmitida através do lastro, mas aumenta os níveis de vibração nos dormentes, o que pode acarretar um problema na sua manutenção (FERNÁNDEZ et al., 2018).

A partir da Figura 5 é possível observar que, com exceção dos dormentes, os valores de pico de aceleração foram reduzidos, o que significa que a adição das partículas de borracha é capaz de reduzir a vibração na maior parte da superestrutura ferroviária, minimizando o desconforto humano e reduzindo riscos de danos a edificações próximas.

Baseado em estudos realizados com partículas de borracha e nos resultados obtidos por eles, um protótipo de faixa de lastro foi estabelecido para verificar o seu comportamento dinâmico com o uso de partículas de borracha de pneu como material de sublastro. Inicialmente, os testes laboratoriais buscaram selecionar as partículas de borracha que poderiam ser utilizadas como material de sublastro. Para a definição da granulometria das partículas, foram utilizadas as equações de Terzaghi e Casagrande para construção da curva de granulometria do material. (ESMAEILI et al., 2015)

Após a preparação do material, o painel de pista foi montado, contendo um lastro de dimensões 6m x 4m x 0.3 m, acima de uma camada de 20 cm de partículas de borracha. Foram determinados os pontos de impacto, onde o martelo de 93,5 kg seria liberado e os pontos onde a aceleração (resposta ao impulso do martelo) seria medida. Foram determinados quatro pontos distados de 2 m cada um, para determinação da resposta ao impulso (ESMAEILI et al., 2015).

Em termos percentuais, os resultados obtidos pelo teste de impulso-resposta mostraram que, no lastro, a 2 m da fonte de excitação, a velocidade de vibração foi de 97,95 m/s para 89,59 m/s, caracterizando redução de 8,5% na vibração, a mínima redução obtida no teste. Já no ponto localizado também no lastro, porém a 8 m da fonte de excitação, a velocidade de vibração foi de 88,82 m/s para 63,38 m/s, ou seja, houve redução de 28,6% na vibração, sendo esta a maior redução encontrada no teste (ESMAEILI et al., 2015).

Todos os estudos mencionados acima, demonstram o potencial da utilização das partículas de borracha no sublastro ferroviário. As partículas podem ser adicionadas a essa camada sem que suas propriedades exigidas pelas normas e instruções ferroviárias sejam prejudicadas e, além de dar aos pneus um novo uso, ainda melhora propriedades importantes da camada de sublastro, que podem contribuir para o aumento da vida útil da ferrovia e melhorar condições de conforto para os passageiros e também para as pessoas que residem próximas às linhas ferroviárias, quando se trata da redução de vibrações.

Os pneus de borracha possuem estrutura cilíndrica capaz de promover o confinamento de material, minimizando o deslocamento lateral, podendo ser utilizado na estabilização das fundações. Tais propriedades dos pneus fizeram com que Indraratna (2017) explorasse não só o benefício da adição das partículas de borracha na camada de sublastro, mas explorasse também as propriedades do material de descarte (pneu) como um todo. Nos testes laboratoriais realizados, os agregados comumente usados para camadas de sublastro, adquiridos de uma pedreira localizada na Austrália foram inseridos dentro de um pneu de borracha. Foram

realizados testes de cargas de placas com intuito de verificar os mecanismos de transferência de cargas entre o enchimento e o pneu. Verificou-se que para uma carga de 600kPa a tensão vertical no centro do pneu e na interface entre o sublastro e o subleito era de 400kPa para o material sem reforço e 264kPa para o material com reforço. Percebeu-se também que a inclusão de um pneu de borracha reduziu o estresse transmitido ao subleito, sendo que para a mesma carga de 600kPa o estresse diminuiu de 470kPa para 82kPa (INDRARATNA et al., 2017).

Os resultados experimentais mostraram que o reforço com o pneu pode fornecer mais de 50% de ganho na rigidez da camada de sublastro, aumentar sua espessura e consequentemente tornar a camada de lastro mais econômica (INDRARATNA et al., 2017).

## CAPÍTULO 3

### 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como mostrado ao decorrer do capítulo 2, os materiais não convencionais estudados possuem propriedades que fazem desses materiais, em sua maioria, adequados para utilização em camadas da superestrutura ferroviária. Inúmeros são os benefícios da utilização de resíduos para a construção de ferrovias. Além de minimizarem impactos ambientais que são causados por esses resíduos, há a questão de preservação das jazidas naturais que deixam de ser exploradas e a preservação da paisagem. Os resíduos estudados nos trabalhos abordados no capítulo anterior foram resíduos de borracha de pneu, escória (GGBF e EAF), rejeitos de mármore, RCD e resíduos de polímeros.

Os resíduos de borracha de pneu foram utilizados em todos os elementos da superestrutura ferroviária, com exceção dos trilhos, e apresentaram resultados satisfatórios comparados com materiais convencionais para as propriedades mecânicas e físicas estudadas. Nos dormentes produzidos de concreto com fragmentos de borracha, todos os resultados obtidos para os ensaios mecânicos foram superiores aos encontrados para o concreto convencional. A adição de partículas de borracha para camadas de lastro e sublastro reduziu a frequência de ressonância, diminuiu o pico de aceleração e aumentou o amortecimento, o que reduz a vibração, conseqüentemente. Uma exceção foi notada no estudo realizado por Fernández et al. (2018), onde a adição das partículas de borracha provocou aumento na vibração dos dormentes.

A escória utilizada em concretos para dormentes melhorou o desempenho do concreto à fadiga e à flexão, diminuiu a deflexão causada por impacto e aumentou a carga máxima de impacto, em relação ao concreto convencional. No que diz respeito à compressão, a escória GGBF aliada à escória EAF ou à adição de fibras de aço teve resistência maior que o concreto convencional. Nos estudos que desenvolveram concreto somente com a adição de escória GGBF, os resultados de resistência à compressão foram inferiores ao concreto convencional. Para o lastro, a escória apresentou valores de resistência à abrasão Los Angeles menores que o valor máximo dado pela norma brasileira, portanto, obteve resultado satisfatório nesse quesito. Apesar da massa específica estar acima da mínima especificada pela norma, a escória utilizada para lastro obteve absorção de água e porosidades acima das máximas permitidas pela norma

brasileira. Quanto à resistividade elétrica, foram observados valores menores ao valor normativo, sendo necessários mais estudos para verificação desta propriedade.

Os rejeitos de mármore foram utilizados somente para dormentes. Os valores de resistência à tração diametral, tração à flexão e módulo de elasticidade foram superiores a essas propriedades para dormentes de concretos, mostrando que sua utilização é viável tecnicamente.

Os polímeros reciclados que foram estudados para dormentes apresentaram melhor resistência à compressão que o concreto convencional mas alguns tiveram resistência à compressão menor quando comparados à madeira. Dentre eles, o polímero de plástico reciclado com adição de borracha apresentou a maior resistência à compressão, superando a resistência da madeira. Já o módulo de elasticidade de todos os polímeros reciclados foi inferior ao módulo de elasticidade do concreto convencional e da madeira.

Entre os materiais estudados, as partículas de borracha de pneus se destacam. Em todos os resultados apresentados, a adição das partículas de borracha melhorou propriedades importantes dos materiais comumente utilizados, seja para dormente, lastro ou sublastro.

É possível perceber ainda que poucos são os tipos de resíduos testados para a construção de ferrovias. Há muitos resíduos gerados pelas atividades humanas que podem ser estudados para integrar a lista de materiais alternativos para a superestrutura ferroviária. Essa é uma linha de pesquisa interessante para estudos futuros.

No Brasil, a malha ferroviária é pequena, o que possibilita que sua futura expansão seja realizada já com alguns materiais alternativos. Para isso faz-se necessário que mais pesquisas sejam realizadas, principalmente no Brasil, com a incorporação desses materiais nas camadas da superestrutura ferroviária.

## REFERÊNCIAS

- AASHTO. Standard method of the test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials. [S.l.]. T 307-99, 2003.
- ABNT. Dormente de concreto - Projeto, materiais e componentes. [S.l.]. NBR 11709 2015.
- ABNT. Via férrea - Lastro Padrão. [S.l.]. NBR 5564 1991.
- ACI. Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete. [S.l.]. 544.2R-89 1999.
- ALI, M.; HOSSAIN, M. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 2252-2261, 2011.
- AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION. **Manual of railway engineering and maintenance of way association**. Lanham: [s.n.]. 2013.
- AREA. **Manual for Railway Engineering**. Lanham: **American Railway Engineering Association**. [S.l.]. 1991.
- ASTM C131:2006. **Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
- ASTM C215:2002. **Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens**. [S.l.]. 2002.
- ASTM D1557:2012. **Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort**. [S.l.]. 2012.
- BACKTIARY, A. et al. An Experimental and Numerical Study on the Effect of Different Types of Sleepers on Track Lateral Resistance. **International Journal of Transportation Engineering**, 2015.
- BENETTI, A. B. O desenvolvimento do transporte ferroviário de cargas: Um estudo da malha paulista. **FATECLOG**, Junho 2013. 37-46.
- BRINA, H. L. **Estradas de Ferro 1**. Rio de Janeiro: UFMG, 1979.
- CAMPOS, JOSÉ JURANDI LOPES. "Análise De Dormente Polimérico Reciclado Como Solução Financeira Viável Para Substituição De Dormente De Madeira Dos Amv's Da Via Permanente." **21ª Semana de Tecnologia Metroferroviária**. 2015.
- CANDIAN, LÍVIA MATHEUS. "Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais." **Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo**. São Carlos, 2007.
- CARVALHO, DENYS NUNES. "O papel das Ferrovias no crescimento econômico do Brasil." **Trabalho de Conclusão de Curso**. Recife, Janeiro 2019.

CARVALHO, J. F. D. et al. Low environmental impact cement produced entirely from industrial and mining waste. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2019.

CIOTLAUS, M. et al. Rail-wheel interaction and its influence on rail and wheels wear. **Procedia Manufacturing**, 2019. 895-900.

COLENCI, ROBERTO ANTONIO. "Qualificação Mecânica de Madeiras para uso como dormente ferroviário." **Dissertação de mestrado**. Botucatu - SP, Maio 2002.

CORDEIRO, LEONARDO SANTOS, PAULO MARTINEZ FRANCO, and RONY LUIS DOS SANTOS. "Comparação entre a utilização do transporte rodoviário e ferroviário no Porto de Santos." **16º Congresso Nacional de Iniciação Científica**. 2016.

DE PAIVA, C. ; BUCK, A. P.; FERREIRA, A. Sub-ballast performance in Brazilian railway infrastructures. **Construction and Building Materials**, 25 Setembro 2018. 164-169.

DELGADO, BRUNO GUIMARÃES. "Análise da deformabilidade de um solo tropical do oeste do Maranhão como material de sublastro na estrada de ferro de Carajás." **Dissertação de Mestrado**. Ouro Preto, Junho 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Projeto de Superestrutura da Via Permanente - Lastro e Sublastro**. [S.l.]. ISF - 212 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Projeto de Superestrutura da Via Permanente - Trilhos e Dormentes**. [S.l.]. ISF - 213 2015.

DOS SANTOS, D. B. et al. A infraestrutura no transporte ferroviário no Brasil. **South American Development Society Journal**, 15 Março 2018. 38-51.

DYK, BJV, MS DERSCH, and JR EDWARDS. "Internacional concrete crosstie and fastening system survey." **United States Department of Transportation (US DOT), Federal Railroad Administration (FRA)**. Washington DC, USA, 2012.

ELLER, R. D. A. G.; SOUSA JUNIOR, W. C. D.; CURI, M. L. C. Custos do Transporte de Carga no Brasil: rodoviário versus ferroviário. **Revista de Literatura dos Transportes**, p. 50-64, 2011.

ESMAEILI, M. et al. Experimental study on dynamic properties of railway ballast mixed with tire derived aggregate by modal shaker test. **Advances in Mechanical Engineering**, 28 Fevereiro 2016. 1-13.

ESMAEILI, M.; REZAEI, N. In situ impact testing of a light-rail ballasted track with tyre-derived aggregate subballast layer. **Internacional Journal of Pavement Engineering**, 10 Fevereiro 2015. 176-188.

FERDOUS, W. et al. Composite railway sleepers – Recent developments, challenges. **Composite Structures**, 1 Setembro 2015. 158-168.

FERDOUS, W.; MANALO, A. Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies - Review of current practice. **Engineering Failure Analysis**, 26 Abril 2014. 17-35.

FERNÁNDEZ, P. M. et al. Real scale evaluation of vibration mitigation of sub-ballast layers with added tyre-derived aggregate. **Construction and Building Materials**, 20 Março 2018. 335-346.

FIGUEIRÊDO, PEDRO RAMALHO, CAROLINA COELHO MARTUSCELLI, and UGO NOGUEIRA CASTAÑON. "Simulação Numérica do Uso de Materiais Compósitos em Dormentes Ferroviários." Anais da SIMMEC . Diamantina, 2016.

GARCIA, A. A. T. et al. Tecnologia dos materiais: polímeros usados na construção civil. **Ciências Exatas e tecnológicas**, v. 4, Maio 2018. 105-124.

GONG, H. et al. Direct shear properties of railway ballast mixed with tire derived aggregates: Experimental and numerical investigations. **Construction and Building Materials**, 2019. 465-473.

GOVERNO FEDERAL DO BRASIL. Programa de Parcerias de Investimentos, 2019. Disponível em: <<https://www.ppi.gov.br/projetos1#/s/Em%20andamento/u//e/Ferrovias/m//r/>>. Acesso em: 06 Junho 2019.

GUIMOND-BARRET, A. et al. Free-free resonance testing of in situ deep mixed soils. **Geotech Test**, 2013. 1-9.

GUO, Y. et al. Effects of crumb rubber size and percentage on degradation reduction of railway ballast. **Construction and Building Materials**, p. 210-224, 2019.

HAMEED, A. S.; SHASHIKALA, A. P. Suitability of rubber concrete for railway sleepers. **Recent Trends in Engineering and Material Sciences**, 17 Fevereiro 2016. 32-35.

IACOBESCU, R. et al. Valorization of electric arc furnace steel slag as raw material for low energy belite cements. **Journal of Hazardous Materials**, p. 287-294, 2011.

ICIMOTO, FELIPE HIDEYOSHI. "Dormentes em madeira laminada colada de pinus oocarpa." **Dissertação de Mestrado**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

INDRARATNA, B.; SUN, Q.; GRANT, J. Behaviour of subballast reinforced with used tyre and potential application in rail tracks. **Transportation Geotechnics**, 19 Agosto 2017. 26-36.

JOHN, VANDERLEY M. "Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento." **Tese - Escola Politécnica Universidade de São Paulo**. São Paulo, Fevereiro 2000.

KAEWUNRUEN, S. "Sleepers and fastenings." **Track design fundamentals**. Rail Corporation, 2010.

KAJASTE, R.; HURME, M. Cement industry greenhouse gas emissions - management options and abatement cost. **Journal of Cleaner Production**, p. 4041-4052, 2016.

KOH, T. et al. Structural performances of an eco-friendly prestressed concrete sleeper. **Construction and Building Materials**, 13 Novembro 2015. 445-454.

KOREAN RAILWAY STANDARDS. **Prestressed Concrete Sleeper**. [S.l.]. KRS TR 0008-11 (R) 2011.

MACÊDO, FERNANDA BITTENCOURT. "Estudo do desgaste de trilhos ferroviários." **Monografia**. Juiz de Fora, Junho 2009.

MAIA, MARIANA PAES DA FONSECA. "Ecodor: proposta de mistura sustentável destinada à fabricação de dormentes de concreto." **Dissertação de Mestrado em Ambiente Construído da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora**. Juiz de Fora, 2012.

MANALO, A. et al. A review of alternative materials for replacing existing timber sleepers. **Composite Structures**, 1 Setembro 2009. 603-611.

MARTUSCELLI, CAROLINA COELHO. "Efeito da adição de resíduos de borracha de pneus nas propriedades de compósitos polímeros-cerâmicos." **Dissertação de Mestrado de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João del Rei**. São João del Rei, 2013.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEIN, R. N. Produção de cimento : impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em debate**, 2012. 75-96.

MOHAMMADINIA, A. et al. Flexural fatigue strength of demolition aggregates stabilized with alkali-activated calcium carbide residue. **Construction and Building Materials**, 2019. 115-123.

NETO, CAMILO BORGES. "Manual Didático de Ferrovias." **Apostila - Departamento de Transportes da Universidade Federal do Paraná**. 2012.

NIELSEN, J. et al. Train-Track Interaction and Mechanisms of Irregular Wear on Wheel and Rail Surfaces. **Vehicle System Dynamics**, 09 Agosto 2010. 3-54.

OLIVEIRA, RALPH WERNER HERINGER. "Caracterização da escória de ferro silício-manganês para a aplicação como agregado em pavimentação ferroviária." **Dissertação de Mestrado**. Ouro Preto, Dezembro 2013

PARENTE, A.; PINHEIRO, L. M. Plásticos reciclados para elementos estruturais. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v.10, 2008. 75-95.

PINTO, PRISCILLA MERITELLO. "Modelo técnico-econômico para escolha de dormente." **Trabalho de Conclusão de Curso do Programa de Pós Graduação em Transporte Ferroviário de Carga**. Rio de Janeiro, 2012.

PORCARO, R. R. et al. Microestrutura e propriedades mecânicas de um aço para trilhos ferroviários soldado por centelhamento. **Soldagem e Inspeção**, 08 Maio 2017. 59-71.

QIAO, P.; DAVALOS, J. F.; ZIPFEL, M. G. Modeling and optimal design of composite-reinforced wood railroad crosstie. **Composite Structures**, p. 87-96, 1998.

RANGEL, GEORGE WILTON ALBUQUERQUE, et al. "Modelagem computacional do pavimento ferroviário usando concreto asfáltico como alternativa para a construção da camada de sublastro." **18º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária**. Foz do Iguaçu, PR, 2015.

SALLES, ANA CLAUDIA NIOAC DE. "Emissões de gases do efeito estufa dos dormentes de ferrovias de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha com base nos seus ciclos de vida." **Tese de Doutorado** . Rio de Janeiro, Maio 2009.

SÁNCHEZ, M. S.; NAVARRO, F. M.; GÁMEZ, M. C. R. The use of elastic elements in railway tracks: A state of the art review. **Construction and Building Materials**, 02 Dezembro 2014. 293-305.

SEMPREBONE, PAULA DA SILVA. "Desgastes em trilhos ferroviários - Um estudo teórico." **Dissertação de mestrado**. Campinas, SP, 2005.

SHARMA, V. K. et al. Disposal of waste tyres for energy recovery and safe environment. **Applied Energy**, 2000. 381-394.

SHIN, H.-O. et al. Mix design of concrete for prestressed concrete sleepers using blast furnace slag and steel fibers. **Cement and Concrete Composites**, p. 39-53, 2016.

SIGNES, C. H. et al. An evaluation of the resilient modulus and permanent deformation of unbound mixtures of granular materials and rubber particles from scrap tyres to be used in subballast layers. **Transportation Research Procedia** , Junho 2016. 384-391.

SIGNES, C. H. et al. Analysis of the vibration alleviation of a new railway sub-ballast layer with waste tyre rubber. **Material and Structures**, 2017.

SILVA JUNIOR, R. F. D. A formação da infraestrutura ferroviária no Brasil e na Argentina. **UFPR**, p. 19-33, 2007.

SOUSA, GUSTAVO MARÇAL DE. "Estudo experimental de escórias de aciaria para fins de caracterização tecnológica como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas." **Dissertação de Mestrado**. Ouro Preto, Julho 2007.

SPANISH MINISTRY OF PUBLIC WORKS. **Pliego de Prescripciones Técnicas Generales de Materiales Ferroviários PF - 7: Subbalasto (general technical specifications for railway materials PF-7: subballast)**. [S.l.]. 2006.

SULLIVAN, H. W.; MACK, W. A. **Polymeric compositions and methods for making construction materials from them**. 5,886,078, 23 Março 1999.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **A Sustentabilidade dos Materiais de Construção**. Vila Verde: Gráfica Vilaverdense, 2010.

TRINDADE, EVERTON JÚNIO. "Análise sobre a utilização de Dormentes de Concreto como solução alternativa para a Via Permanente na MRS Logística S. A." **Trabalho Final de Curso de Especialização em Engenharia de Transporte Ferroviário de Carga**. Rio de Janeiro, 2012.

VAN, E. G.; CATTELL, C.; HELDT, T. Fibre composite structures in Australia's civil engineering market: an anatomy of innovation. **Struct Eng Mater**, 2005. 60-150.

WANG, J.; ZHOU, C. Finite element analysis of the wear fatigue of rails with gradient structures. **Materials Letters**, 15 Novembro 2018. 35-37.

WBCSD. End-of-Life Tires: A framework for effective management systems, Junho 2010. Disponível em: <<https://www.wbcd.org/Sector-Projects/Tire-Industry-Project/Resources/End-of-Life-Tires-A-framework-for-effective-management-systems>>. Acesso em: 06 Junho 2019.

WILLIAMS, J. The Earthbound Report - What can the world do with 1.5 billion waste tyres?, 29 Junho 2017. Disponível em: <<https://earthbound.report/2017/06/29/what-can-the-world-do-with-1-5-billion-waste-tyres/>>. Acesso em: 06 Junho 2019.

YANG, J.-M. et al. Benefits of blast furnace slag and steel fibers on the static and fatigue performance of prestressed concrete sleepers. **Engineering Structures**, p. 317-333, 2017.

YOO, D.-Y. et al. Effects of blast furnace slag and steel fiber on the impact resistance of railway prestressed concrete sleepers. **Cement and Concrete Composites**, p. 151-164, 2019.

ZAREMBSKI, AM. "Concrete vs. wood tie: making the economic choice." **Conference of maintaining railway track: determining cost and allocating resources**. Arlington, VA, 1993.