

INTERVENIÊNCIA DE REFORÇO EM LASTRO FERROVIÁRIO SOB CARGA DE ALTO TRÁFEGO

Interveniencia of reinforcement in railway ballast with load of high traffic

Luiz Gustavo Paulo Oran^a, Delma de Mattos Vidal^a, José Amaro de Souza Romero^b, Kledermon Garcia^b, Elizeu do Nascimento Filho^b

^a Divisão de Engenharia Civil, ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil

^b Sub-divisão de Ensaios Estruturais, IAE - ASA E - CTA, São José dos Campos, Brasil

RESUMO – Os lastros constituintes da superestrutura de vias permanentes, quando submetidos a cargas cíclicas de alta intensidade e frequência, sofrem desgaste rápido em sua estrutura portante. Os desguarnecimentos e nivelamentos dos lastros demandam grandes volumes por quilômetro devido à sua degradação. Seus ombros e altura mínimos de construção definem contornos de seções com largas bases de brita. Devido a isso, o desgaste do particulado e seus custos de manutenção inflam o orçamento das ferrovias. Com esse mote, escolheu-se aqui caminhar por um itinerário investigativo cujo paradigma tem seu cerne no conceito de confinamento e seus efeitos sobre o Módulo de Resiliência do lastro. A pesquisa se manteve nos efeitos práticos de reforços por geogrelhas aplicado dentro do corpo do lastro e não na interface com a camada subjacente. Nesse trabalho atingiu-se o objetivo proposto de levantar parâmetros diretivos para orientar ensaios de desempenho de reforços e possibilitar a melhor compreensão das causalidades decorrentes das propriedades específicas das geogrelhas como abertura da malha e rigidez dos elementos, bem como correlacionar o efeito da cota de posicionamento do reforço e os efeitos sobre o grau de confinamento gerado.

ABSTRACT – The ballasts constituent of the superstructure of railways, when submitted to cyclic loads of high intensity and frequency, suffer rapid wear in its supporting structure. The dismantling and levelling of ballasts demand large volumes per kilometer due to their degradation. Its minimal shoulders and height of construction define contours of sections with wide gravel bases. Because of this, particulate wear and its maintenance costs inflate the railroad budget. It was chosen to walk here on an investigative itinerary whose paradigm has its core in the concept of confinement and its effects on the Resilience Module of the ballast. The research remained on the practical effects of geogrid reinforcements applied within the ballast body and not at the interface with the underlying layer. In this work, the proposed goal of raising directional parameters to guide reinforcement performance tests and to better understand the causalities arising from geogrids specific properties such as mesh opening and stiffness of the elements, as well as correlating the position quotation effect reinforcement and its effects onto the degree of confinement generated.

Palavras Chave – Lastro reforçado com geogrelha, carga cíclica, atuador hidráulico.

Keywords - Reinforced ballast with geogrid, cyclic load, hydraulic actuator.

E-mails: oran@oran.eng.br (L. Oran), delma@ita.br (D. Vidal), amarojasr@iae.cta.br (J. Romero), kledermonkg@iae.cta.br (K. Garcia), elizeuenf@iae.cta.br (E. Filho)

1 – INTRODUÇÃO

Indraratna *et al.* (2011) comentam ser fato incontestável que os projetos de ferrovias sejam basicamente os mesmos há séculos, apesar da velocidade e da carga de transporte terem sofrido forte crescimento. A concepção de projeto considera em geral um sub-laço compactado sob um laço de pedra resistente, sobre o qual repousam trilhos de aço assentados em dormentes de concreto. Nessa geometria pelos ombros que tem a finalidade de reduzir o espalhamento lateral provocado no instante da passagem das composições férreas.

Dessa maneira, o laço de vias permanentes tem sido executado e tratado como uma camada pouco confinada de suporte de cargas. O grau de liberdade lateral oriundo desse fraco confinamento permite movimentos cuja consequência é a contaminação por finos exógenos e endógenos, amplificadores dos custos de manutenção, resultantes do inadequado grau confinante existente nesses projetos convencionais. Portanto, caso a engenharia possa projetar estruturas nas quais o confinamento do agregado seja superior ao que se consegue nesses projetos tradicionais, deve-se obter como resultado, estruturas mais estáveis e de maior capacidade de suporte a cargas estáticas verticais e cíclicas. O transporte de carga apresenta desafios cada vez maiores. Por exemplo, a VALE, produtora de minério de ferro e de níquel, estabelece para seus trens na Estrada de Ferro Carajás - EFC - parâmetros atuais que demandam velocidades em torno de 70 km/h, com 37,5 toneladas/eixo.

A relação causal da presença de estruturas com características ativas de confinamento de laço de vias permanentes e o pensamento heurístico fornecem maior abrangência a esse princípio de simular as condições reais de tráfego por meio de atuadores hidráulicos. Portanto, a utilização de um aparato com capacidade de reproduzir condições semelhantes às condições de campo é uma das alternativas possíveis de ensaio cuja aplicação encontra grande alinhamento com as condições realísticas das vias permanentes de transporte de minério, salvo suas intempéries.

Ensaio triaxiais sob cargas cíclicas realizados por Indraratna *et al.* (2010) e Merheb (2014) comparam variações de tensões confinantes e registraram sua relação causa-efeito. Cook e Horvat (2014) e Horvat e Klompaker (2014) avaliaram as faixas de influência nas profundidades de aplicação dos reforços de laço com resultados que indicam interferência positiva da geogrelha como reforço, mas que não tem aplicação direta em projetos, inclusive porque não aplicaram cargas cíclicas em frequência representativa da realidade, bem como as tensões alcançadas também estavam aquém das praticadas nas vias permanentes de transporte de minério. Essa interveniência, segundo McDowell *et al.* (2006) é otimizada a uma razão para as dimensões relativas do binômio laço-geogrelha. Para validarem a modelagem por elementos discretos realizaram ensaios e chegaram à proporção de 1,4 para a razão diâmetro nominal da abertura/diâmetro nominal do laço da malha da geogrelha.

Estudos com corpos de prova realísticos, em verdadeira grandeza, tendem a fornecer dados de saída de maior carga conclusiva e confiável, cujos resultados são importantes a validações de Modelos Mecanísticos. O estado da arte, pois, reside em conseguir aplicar cargas cíclicas típicas de composições ferroviárias a corpos de prova construídos com elementos em grande escala ou escala real. Vizcarra (2017), com ensaios em equipamento prismoidal triaxial cíclico, reforçou as conclusões sobre a influência da granulometria sobre as deformações permanentes e quebra do laço. Concluiu que lastros mais uniformes que os recomendados pela norma brasileira, quando submetidos a cargas cíclicas, apresentaram menor deformação permanente e menor quebra de partículas.

Para correlacionar a estabilidade do conjunto agregado-geogrelha, é preciso considerar aspectos do agregado tais como geometria, granulometria, densidade, resistência à abrasão (CLA) e resistência ao cisalhamento. Qian *et al.* (2015) afirmam que aspectos das geogrelhas utilizadas como reforços, tais como a rigidez dos nós, abertura da malha, resistência e rigidez dos elementos, determinam o desempenho do sistema.

Desse modo, os resultados do presente trabalho tiveram seu cerne na avaliação do grau de interferência da utilização da geogrelhas sobre o aumento do grau de confinamento do particulado de lastro e conseqüente aumento de seu Módulo de Resiliência. Para tanto, foram utilizadas configurações de montagem de lastro que maximizassem a interveniência desse reforço já que sem confinamento longitudinal no eixo dos trilhos e sem o lateral pelos ombros, os corpos de prova ficaram submetidos apenas à tensão confinante derivada do imbricamento da geogrelha. Atingiu-se a meta de obter parâmetros para nortear os próximos ensaios. As configurações de representatividade englobaram o aspecto de confinamento longitudinal intrínseco às vias permanentes, com aparato de perfil metálico representando o seccionamento transversal da via. Nesse novo prisma estão as propriedades específicas das geogrelhas, cuja interferência tem seu mote na rigidez dos nós e elementos de tiras sobre o Módulo de Resiliência.

2 – CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS

Cuidou-se em maximizar a visualização do efeito da geogrelha, adotando-se nesta fase da pesquisa corpos de prova na forma de tronco de pirâmide, sem confinamento lateral ou longitudinal, e total supressão do ombro, com objetivo de analisar no extremo a interveniência da presença de reforço de geogrelha, dando liberdade de deslocamento lateral em ambos os eixos horizontais, conforme as inclinações sugeridas na DNIT-ISF 212 (2015), que também indica uma espessura do lastro de 30cm para base rígida.

Para avaliação de possível espectro de influência de reforço com geogrelha nesse estudo, três situações serão analisadas, neste contexto de montagem em tronco de pirâmide: sem reforço, com um reforço a 10cm do topo e com um reforço a 20cm do topo, denominadas respectivamente R0, R1 e R2. A Figura 1 apresenta a geometria de montagem dos ensaios com lastro reforçado e a Figura 2 ilustra suas etapas de montagem.

Nessa construção foi utilizada uma placa de compensado tipo tapume, com o intuito de evitar contato direto metal-brita, pois a base do atuador hidráulico é uma espessa chapa metálica. Sobreposto a essa placa foi posicionado um geocomposto geogrelha/geotêxtil não tecido, conforme nomenclatura definida pela ABNT-NBR 13.370 (2017) e adotada pela IGS Brasil, nas dimensões de 1,30m x 1,30m, para evitar o espalhamento lateral na interface. Por cima foi posicionada a quantidade prevista de lastro para compor o corpo de prova, com as dimensões pré-definidas para as configurações com e sem reforço. Na seqüência dos ensaios, verificou-se ser indiferente para o espalhamento lateral na base a presença desse geocomposto.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Brita

Para o lastro foi utilizada uma brita da Pedreira Jambreiro/SERVENG, em São José dos Campos-SP, típica de lastro ferroviário, com a granulometria indicada no Quadro 1. Em particular, a amostra

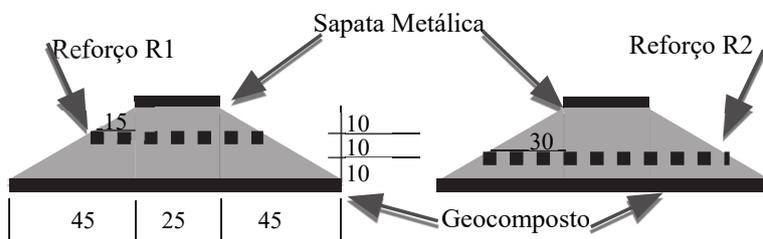


Fig. 1 - Esquema de montagem dos corpos de prova (dimensões em cm).



(a) Tapume na base



(b) Geocomposto



(c) Corpo de prova montado



(d) Nivelamento

Fig. 2 - Etapas de montagem do corpo de prova.

do material do lastro foi selecionada com granulometria concordante com ABNT-NBR NM 26 (2001) e AREA n. 24, mostrada no Quadro 2, enquanto suas características geométricas apresentavam lamelaridade e alongamento acima das taxas orientadas por estas normas, aspectos estes causadores de maior degradação e formação de finos e conseqüente expectativa de pior desempenho e menor vida de serviço.

Para esta brita do Quadro 2, ensaios de resistência à abrasão (CLA) indicaram 35% de perda, resultado dentro dos padrões da ABNT-NBR 5564 (1991), embora a Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM) e a Ferrovia Centro-Atlântica (FCA) adotem até 25%. O peso específico dos grãos é 2.400 kg/m³. Cada ensaio necessita de um volume de lastro igual a 0,167m³, com peso aproximado de 400kg.

Quadro 1 – Distribuição Granulométrica da Brita 3 - Pedreira SERVENG/Jambeiro.

Peneiras		Amostra 1			
		Peso da Amostra			% Passante
Abertura (mm)	Malha (ABNT)	Peso Retido Acumulado (g)	% Retido na Peneira	% Retido acumulado	
63,5	2 1/2"	0	0	0	100
50,8	2"	2.412,00	12,99	13,0	87,0
37,5	1 1/2"	12.590,00	67,83	80,8	19,2
25,4	1"	2.236,10	12,05	92,9	7,1
19,1	3/4"	920,00	4,96	97,8	2,2
12,7	1/2"	-	-	-	-

Quadro 2 – Granulometria da brita de lastro na NM 26 e na AREA n. 24.

Abertura #	% Passante	
	NM 26	AREA n. 24
76(3")	-	100
64(2 1/2")	100	90-100
50(2")	80-100	-
38(1 1/2")	40-70	25-60
25(1")	10-30	-
19(3/4")	0-10	0-10
12,5(1/2")	0-5	0-5

3.2 – Geogrelha

O reforço utilizado foi uma geogrelha tecida em poliéster, denominada pelo fabricante FORTRAC 80/80 70T, com as características de abertura da malha versus diâmetro nominal do lastro dentro da razão verificada McDowell et al. (2006) para melhor desempenho, ilustrada na Figura 3. Considerando essa figura, na horizontal a rigidez medida dos elementos CMD (Cross Machine Direction) foi de (969 ± 23) kN/m e dos elementos MD (Machine Direction) (907 ± 54) kN/m. Valores medidos em um equipamento de tração Instron 5500, de acordo com a diretriz de ensaios da ASTM D6637 (2016).

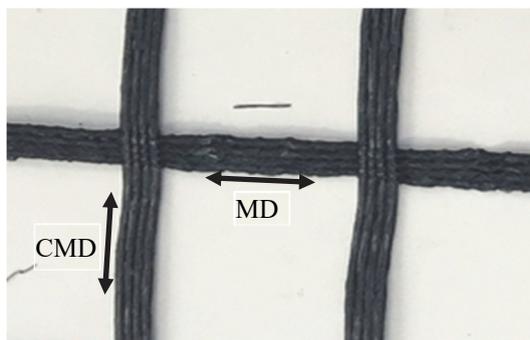


Fig. 3 – Geogrelha Tecida de Poliester.

3.3 – Carregamento aplicado

Para estabelecer as cargas a serem aplicadas adotou-se como padrão a composição de transporte de minério de ferro da Estrada de Ferro Carajás (EFC). Matos et al. (2015) detalham que seus vagões, do tipo GDT, atingem 37,5 toneladas por eixo de carga estática e está com a configuração ilustrada na Figura 4.

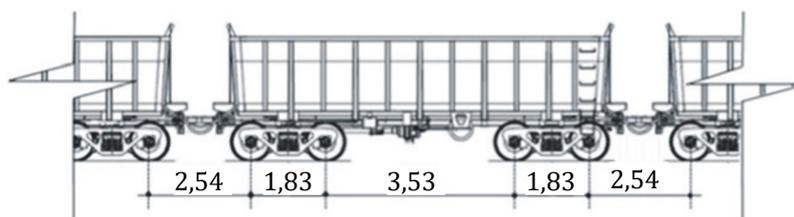


Fig. 4 - Vagão GDT na EFC (dimensões em metros), (Matos et al., 2015).

Conforme Lichtberger (2005), para calcular a carga dinâmica num dormente, constatou-se estarem os eixos suficientemente espaçados de modo a não haver superposição de carregamento, e que apenas 40% da carga aplicada no ponto abaixo do eixo atua sobre o dormente. Um coeficiente dinâmico igual a 2, segundo Nabais (2014), indica uma carga máxima por roda de 15 ton. Adotou-se o resultado observado por Merheb (2014) em estudos de campo. Ele verificou que a tensão residual tende a 50% da tensão máxima aplicada.

Desse modo, a carga cíclica adotada neste estudo variou entre 15,0 e 7,5 toneladas. A partir da área do dormente em campo, dada pela largura dormente (0,24 m) e pela largura da socaria (0,80 m), obtém-se a tensão máxima de 7,81 kgf/cm². Para a área de contato da sapata no ensaio 0,25 m x 0,25 m, a carga aplicada deve ser de 4,88 toneladas para a máxima e 2,44 toneladas para a residual.

3.4 – Cuidados na montagem

A montagem deve garantir as dimensões anotadas na Figura 1, sendo importante assegurar o nível nos 2 eixos horizontais, na superfície do topo do corpo de prova em contato com a sapata metálica. A Figura 5 apresenta uma vista lateral dos ensaios R1 e R2.



(a) Reforço R1



(b) Reforço R2

Fig. 5 - Vista Lateral dos corpos de prova reforçados com Geogrelha.

Submeteu-se cada corpo de prova a uma vibração de compactação inicial, em analogia ao realizado na construção de ferrovias, porém com a sequência de aplicar cargas crescentes à taxa de 10% até atingir a carga máxima de 4,88 toneladas, cuja residual seguiu a proposta de 50% da máxima. O carregamento aplicado foi cossenoidal de 9 Hz, com a tensão máxima e a residual indicadas no item 3.3. No passo seguinte, aplicaram-se 200.000 ciclos de carga cíclica, correspondente a 152 trens de carga da EFC (Estrada de Ferro Carajás/VALE) a uma velocidade de 70 km/h (19,5 m/s), equivalente aos 9 Hz, sendo nove o número de eixos desse tipo de vagão passantes por um mesmo ponto no intervalo de um segundo.

4 – RESULTADOS

A Figura 6 descreve o comportamento ao longo dos abatimentos medidos durante os ensaios. O recalque na configuração R1 foi cerca de 1/4 do obtido para a configuração R0.

Para avaliar a receptibilidade do ensaio, tomou-se a configuração de melhor desempenho, R1, e montou-se uma contra-prova, R1a. Após submissão às mesmas condições de trabalho, os resultados foram satisfatoriamente próximos, mantendo mesmo padrão e ordem de grandeza, como atesta a Figura 7 e sua degradação resultou em 0,15% do volume de lastro do corpo de prova, conforme mostrado no Quadro 3. Os abatimentos e as deformações mantiveram mesmo padrão, amplitude e ordem de grandeza.

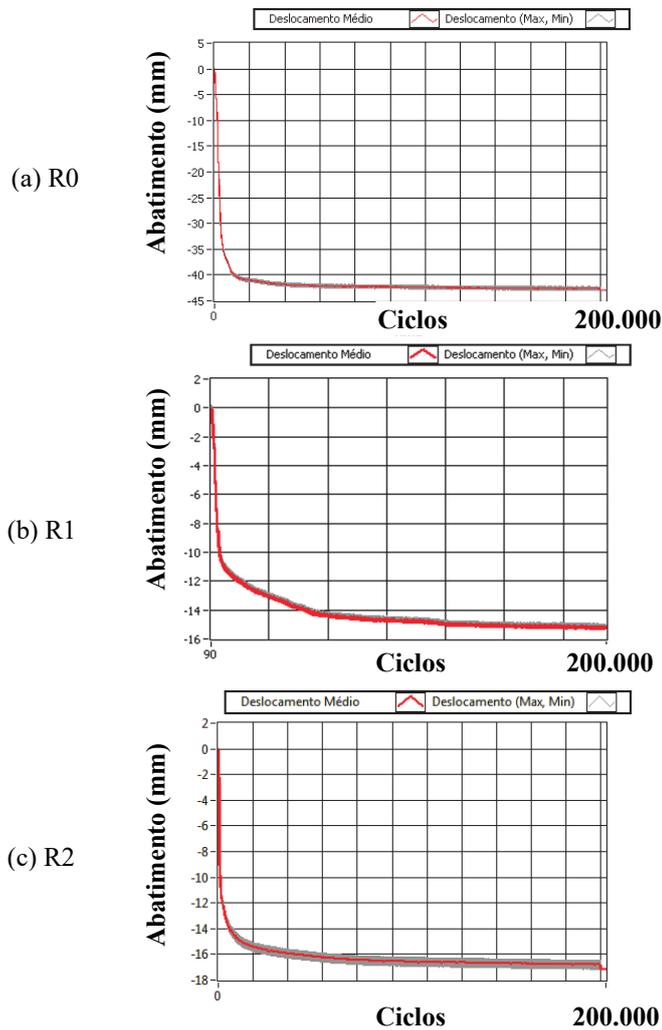


Fig. 6 - Deslocamento nos corpos de prova até 200.000 ciclos de carga cíclica, 9 Hz, conforme indicação de carregamento verificado em campo por Merheb (2014).

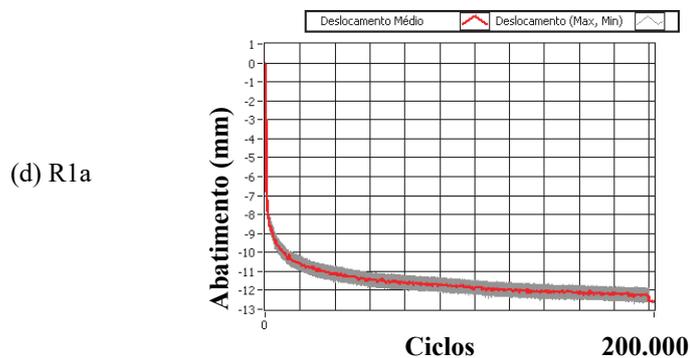


Fig. 7 - Deslocamento no corpo de prova R1a até 200.000 ciclos de carga cíclica.

O Quadro 3 apresenta os dados comparativos de abatimento e deformação, tomados a 20.000 e a 200.000 ciclos de carga no atuador, e degradação tomada ao final dos ciclos. Conforme Selig e Waters (1994), Indraratna e Salim (2005) e Ionescu et al. (1998), nos primeiros 20.000 ciclos ocorrem as deformações mais acentuadas no lastro novo, devido ao processo de compactação pela própria carga transportada. Por essa razão comparou-se a degradação a partir desse ponto até o final da aplicação de carga. Os valores de abatimento estão acrescidos dos abatimentos iniciais durante compactação, não registados nos gráficos gerados a partir do instante seguinte a essa etapa.

Quadro 3 – Comparativo de abatimento, deformação e degradação.

Ciclos	Abatimento (mm)				Deformação				Degradação (%)			
	R0	R1	R1a	R2	R0	R1	R1a	R2	R0	R1	R1a	R2
20 000	41.02	14.69	15.15	24.29	0.24	0.05	0.05	0.07	-	-	-	-
200 000	42.62	17.13	16.72	25.62	0.25	0.06	0.06	0.08	0.67	0.17	0.15	0.38
Avanço	3.90	16.60	10.40	5.50	3.60	16.60	10.40	5.50	-	-	-	-

O Módulo de Resiliência M_r , pode ser calculado a partir dos dados que geraram o gráfico tensão *versus* deformação, parcialmente mostrados na Figura 8, relacionando a tensão resiliente e a deformação resiliente. Os valores obtidos na fase final indicam valores médios para esses módulos. Sendo 113 MPa para o ensaio R0, 528 MPa para o ensaio R1 e 126 MPa para o ensaio R2, evidenciando uma alteração significativa com a presença da geogrelha, principalmente em R1, cujo comportamento de lastro foi de característica mais rígida.

O próprio avanço das deformações apresenta peculiaridades bem definidas entre as situações com e sem reforço. Enquanto os corpos de prova reforçados deformam em maior harmonia, o ensaio R0 demonstrou comportamento errático desde as primeiras toneladas aplicadas pela carga cíclica até o final dos 200.000 ciclos. As quebras de particulado foram maiores desde o início; razão pela qual há saltos na deformação.

A correlação de M_r com a Tensão e a deformação do corpo de prova pode ser percebida na Figura 8. Os avanços da deformação na montagem R1, cujo Módulo de Residência ficaram bem destacado dos demais. Foram mais uniformemente distribuídos desde as primeiras centenas de cargas aplicadas. Tendo menos quebras de partículas, o progresso das deformações é mais lento e suave. Em R2, a uniformidade também pode ser observada, embora a taxa de deformação tenha sido maior nas primeiras centenas de ciclos de carga em contraposição a R1.

5 – COMENTÁRIOS

O ganho no módulo resiliente ao se aplicar o reforço a 20 centímetros base (R1) foi da ordem de 234% em confrontação com a configuração sem Reforço (R0). Já em relação à posição de reforço a 10 centímetros da base (R2), o ganho no Módulo de Resiliência foi de somente 18% em relação ao ensaio sem reforço. Na sequência lógica, a melhoria de Resiliência entre R2 e R1 foi de 183%.

Com 200.000 ciclos de ensaio, equivalente a 7.524.000 de toneladas transportadas, houve boa diferenciação nas deformações permanentes para cada configuração estudada. Para R0 foi de 0,248 (25%); no caso e R1, de 0,058 (5,8%), localizado entre estes, R2 teve 0,075 (7,5%) de deformação. Portanto, a deformação no ensaio R1 foi de 20% da deformação no ensaio R0 e no ensaio R2 foi de 30% do medido no ensaio R0.

Observou-se a forte interveniência do Módulo de Resiliência sobre o abatimento vertical. Pequenas variações nesse indicador resultam em respostas de considerável amplitude no recalque final e na geração de finos. De forma suplementar, notou-se que a configuração R1 teve abatimento total menor ao final dos 200.000 ciclos.

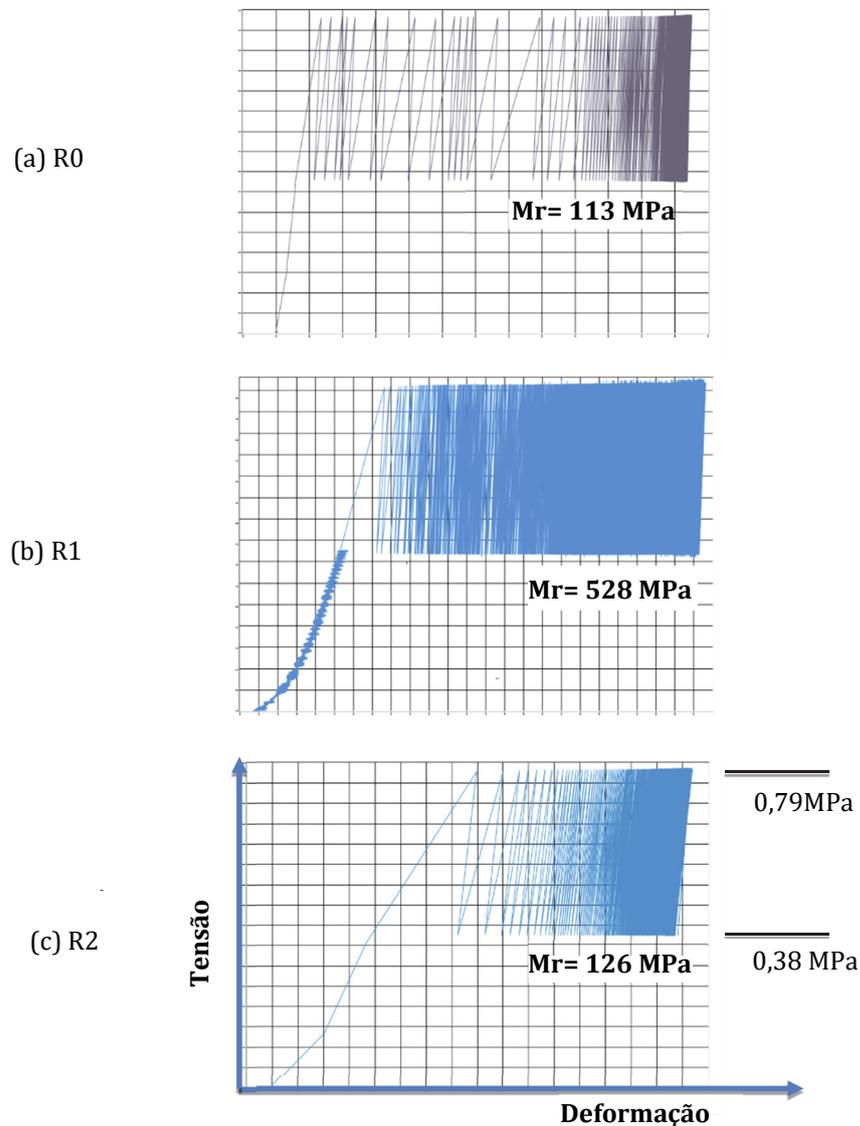


Fig. 8 - Curvas Tensão (MPa) x Deformação para as condições da EFC simuladas no Atuador Hidráulico do IAE/ASA-E.

Esse resultado pode ser explicado pelo fato de com o maior confinamento na zona de maior concentração de tensões, as quebras do particulado do lastro acontecem em menor velocidade e grau, levando mais tempo para que a degradação por quebra atinja os índices medidos para R0 e R2. O abatimento se deu predominantemente por compactação e formação de finos por abrasão que pelas quebras dos particulados diretamente.

Estes resultados explicam por que a aplicação do reforço desse corpo-de-prova sob carga cíclica análoga à aplicada na EFC provocou ganho de desempenho no que diz respeito ao abatimento vertical. Para o mesmo número de passagem de trens - 152 composições - o recalque sofrido para a situação extrema de R0 - sem confinamento lateral nos eixos longitudinais e transversais - foi 2,5

vezes maior ao confrontado com a configuração R1 e 1,7 vezes maior em comparação com a configuração R2. E o abatimento de R2 foi 1,5 vezes maior que o de R1.

Segundo Ribeiro et al. (2014), a norma europeia EN 13450 (2002) a faixa de intervenção varia de 12 mm a 19 mm para trens com velocidades de 60 a 80 km/h e que o limite de recalque seja de 25 mm, cuja não observância expõe a risco a segurança da via.

Magalhães et al. (2009) afirmam que para cada ciclo de nivelamento (25 mm de abatimento) haveria necessidade de repor 3, 25% do volume de lastro. Na configuração R0 com 200.000 ciclos já se estaria próximo ao segundo levante de nivelamento, enquanto para as configurações R1 e R2 ainda não seria realizado qualquer nivelamento. Cada levante de 25 mm equivale a 66 m³ de brita por quilômetro.

A EFC estimou em 260 milhões de toneladas de minérios transportados em 2016. Assumindo que cada vagão tem capacidade de 150 toneladas, são necessários 1.733.333 vagões, ou 5.253 trens de 37,5 toneladas/eixo a 70 km/h. Considerando que um abatimento de 25mm equivale a 40% do lastro degradado, conforme Magalhães et al. (2009), Indraratna e Nimbalkar (2013).

No Quadro 4 estão as estimativas calculadas para a quantidade de intervenções nas configurações dos ensaios. Os desguarnecimentos estão em decimais para melhor entendimento de sua proporção.

Quadro 4 – Prognóstico comparativo de manutenção por configuração para 260 milhões de tonelada transportada em trens da EFC.

	R0	R1	R2
Qt. de Trens/Desguarnecimento	1.113	3.095	2.782
Qt. Desguarnecimentos	4,7	1,7	1,9
Qt. Nivelamentos	58	21	23
Ton. Transportadas/Desguarnecimento	55.820.914	155.263.470	139.552.286
Tempo de Vida de Serviço (Meses)/Desguarn.	2,6	7,2	6,4
MTBT*/Desguarnecimento	55,8	155,3	139,6
Qt trens para 260 Mi ton			
5.253			
*MTBT= Milhões Ton. Brutas Transportadas			

Ao estudarem o Custo do Ciclo de Vida (LCC), Ribeiro *et al.* (2014) afirmaram que pelo fato de as deformações verticais ocorridas nas ferrovias serem do tipo elasto-plásticas - elástico ou resiliente (deflexões) e plásticas ou permanentes (recalques) - para manter a via em condições seguras, a engenharia da EFVM pretende manutenções com serviço de socaria a cada 180 milhões de toneladas brutas trafegadas (MTBT). Desse modo, a estrutura montada no ensaio do reforço R1 foi a única a se aproximar nos resultados de ensaios deste padrão de manutenção, mesmo nas condições limites de inexistência de confinamento também na direção longitudinal ao lastro, ou seja, sob valores desprezíveis de tensão confinante além da presença da geogrelha.

Estes resultados têm importância ao se considerar que, para métodos de compactação por garfos vibratórios, sua penetração no nivelamento poderia destruir a geogrelha situada a 10cm de profundidade. Assim, para se evitar danos ao reforço polimérico por esse tipo de compactação de lastro em via permanente, a aplicação a 20 centímetros de profundidade a partir do topo preservaria a integridade do reforço, embora o desempenho do sistema lastro-reforço tenha significativa perda.

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Da motivação em se obter parâmetros iniciais que indicassem o potencial desempenho de reforços do tipo geogrelha sobre o desempenho estrutural de lastros ferroviários, a estratégia de maximizar a influência da geogrelha por meio de redução de possíveis tensões confinantes não provenientes dela, mas decorrentes dos ombros e da restrições longitudinais ao longo do lastro na via, foi bem alcançada com a configuração em tronco de pirâmide, já que as relações causa-efeito ficaram majoradas.

Outros vetores de desempenho presentes na continuação desses estudos são os aspectos de rigidez dos nós e dos elementos das tiras. A interveniência dessas características será estudada por meio de ensaios similares aos realizados para este estudo, contudo, alterando tipos de geogrelhas para correlacionar suas propriedades de rigidez.

Em decorrência, pode-se extrair dos ensaios apresentados significativas alterações no Módulo de Resiliência a ponto de atribuir características funcionais aos corpos de prova construídos com o lastro menos nobre da amostra utilizada.

A produção de finos por degradação decorrente da passagem de trens simulada pelo atuador hidráulico foi menor em ambos os casos reforçados. E dentre esses, a situação com reforço mais próximo à aplicação da carga R1 sofreu menor degradação.

Pode-se concluir que para o volume de carga acima, o tempo de vida de serviço do lastro estaria prolongado em 3,44 vezes ao se comparar R0 e R1; enquanto na comparação com R2, o ganho seria de 2,50 vezes.

Em relação às interveniências no comportamento da deformação resultante das tensões típicas aplicadas, constatou-se um progresso regular em ambos os casos reforçados - R1 e R2 - em contraponto ao avanço registado para R0, cujo Módulo de Elasticidade oscilou até alcançar seu equilíbrio assintótico.

Nessa sequência, o consumo de brita passaria de 3.854 m³/km/ano em R0 para 1.122 m³/km/ano em R1 e 1.544 m³/km/ano para R2.

A aplicação de geogrelha atribuiu características de resiliência superiores à situação de sua ausência. Mesmo com o fato de as amostras utilizadas serem de características mineralógicas e granulométricas fora das recomendações normativas brasileiras e americanas, o desempenho adquirido após o reforço proporcionou comportamento plenamente satisfatório em ensaios sob condições geométricas desfavoráveis, como o tronco de pirâmide dos corpos de prova, e submetido a solitação de carregamento cíclico de elevado efeito de degradação do lastro.

A presença de geogrelhas, com características de abertura e rigidez controladas, reduziu a influência direta dos aspectos granulométricos e mineralógicos dos materiais de lastro sobre sua degradação.

A utilização de um atuador hidráulico para simular os efeitos de trens de elevada carga/eixo, fora das configurações mais usuais de ensaios triaxiais, representou de forma consistente o carregamento cíclico sem instabilidade da estrutura. Constatou-se que este caminho pode e deve ser explorado em pesquisas mais realísticas sobre novas formas de construção de superestruturas de ferrovias.

Desse modo, devem ser realizados estudos continuados sobre novas configurações de vias permanentes por meio de reforços de seu lastro. Os ganhos de tensão confinante observados nesta investigação sugerem que geometrias mais econômicas podem ser obtidas sem perda de desempenho na vida de serviço do lastro, mesmo sem considerar o usual reforço da camada subjacente.

7 – AGRADECIMENTOS

À Subdivisão de Ensaios Estruturais (ASA-E) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do DCTA, pelo apoio na montagem e realização dos ensaios de carga cíclica com atuador hidráulico, à

Mineradora Serveng/Jambeiro e à Huesker do Brasil, pelo fornecimento de material para ensaios, e à CAPES pelo apoio financeiro.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT-NBR NM 26 (2001). *Agregados - Amostragem*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT-NBR 5564 (1991). *Via Férrea - Lastro Padrão*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT-NBR 13.370 (2017). *Não tecido - Terminologia*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Rio de Janeiro, Brasil.
- ASTM D6637 (2016). *Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-rib Tensile Method*, West Conshohocken, PA.
- Cook, J.; Horvat, F. (2014). *Assessment of Particle of confinement within a mechanically stabilized layer*. 10th International Conference on Geosynthetics. Berlin.
- DNIT-ISF-212 (2015). *Projeto de Superestrutura de Via Permanente - Lastro e Sublastro*. Instrução de Serviço Ferroviário, Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasil.
- EN 13450 (2002). *Aggregates for Railway Ballast*. European Standard - European Committee for Standardization, Brussels.
- Horvat, F.; Klomp maker, J. (2014). *Investigation of confinement effect by using the multi-level shear box test*. 10th International Conference on Geosynthetics, ICG 2014.
- Indraratna, B.; Nimbalkar, S. (2013). *Stress-Strain Degradation Response of Railway Ballast Stabilized with Geosynthetics*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 139, n. 5, p. 684–700.
- Indraratna, B.; Salim, W. (2005). *Mechanics of Ballasted Rail Tracks: a Geotechnical Perspective*. Taylor & Francis Group plc. Londres, 248 pp.
- Indraratna, B.; Salim, W.; Rujikiatkamjorn, C. (2011). *Advanced Rail Geotechnology - Ballasted Track*. Wollongong City: CRC Press.
- Indraratna, B.; Thakur, P.; Vinod, J. (2010). *Experimental and Numerical Study of Railway Ballast Behavior under Cyclic Loading*. International Journal of Geomechanics, Vol. 10, No. 4, pp 136-144.
- Ionescu, D.; Indraratna, B.; Christie, H. D. (1998). *Behaviour of railway ballast under dynamic loads*. Proc. 13th Southeast Asian Geotechnical Conference, Taipei, pp. 69–74.
- Lichtberger, B. (2005). *Track Compendium. Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics*. EURAILPRESS.
- Magalhães, P. C. B.; Duval Filho, E.; Silva, M. W P. (2009). *Via Permanente - Módulo VIII*. São Luís: VALER - Educação VALE.
- Matos, J. C. L.; Branco, V. H. L.; Oliveira, D. R. C. (2015). *Structural assessment of a RC Bridge over Sororó river along the Carajás railway Avaliação estrutural da ponte sobre o rio Sororó na ferrovia Carajás*. v. 8, n. 2, p. 140–151.

- McDowell, G. R.; Harireche, O.; Konietzky, H.; Brown, S. F.; Thom, N. H. (2006). Discrete element modelling of geogrid-reinforced aggregates. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, v. 159, n. 1, p. 35–48.
- Merheb, A. H. M. (2014). *Análise Mecânica do Lastro Ferroviário por Meio de Ensaios Triaxiais Cíclicos*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Nabais, R. J. S. (2014). *Manual Básico de Engenharia Ferroviária*. São Paulo, Oficina de Textos.
- Qian, Y.; Tutumluer, E.; Hashash, Y. M. A. Ghaboussi, J. (2015). *Effects of Ballast Degradation on Permanent Deformation Behaviour from Large-Scale Triaxial Tests*. 2014 Joint Rail Conference, p. 1–5.
- Ribeiro, F. S.; Bernucci, L. B.; da Costa, R. C.; de Moura, Edson. (2014). *Análise do Custo do Ciclo de Vida do Lastro Ferroviário na Estrada de Ferro Vitória-Minas*. [s.d.]. XXVIII ANPET.
- Selig, E. T.; Waters, J. M. (1994). *Track Geotechnology and Substructure Management*. Thomas Telford, London.
- Vizcarra, G. O. C. (2017). *Efeito da Granulometria no Comportamento Mecânico de Lastro Ferroviário*. Tese de Doutorado PUC-RIO.