

# O PAPEL DAS GEOGRELHAS NA ESTABILIZAÇÃO DA CAMADA DE BALASTRO DE INFRAESTRUTURAS FERROVIÁRIAS: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## THE ROLE OF GEOGRIDS IN THE BALLAST LAYER STABILISATION OF THE RAILWAY TRACK: STATE OF THE ART

Pires, Diogo; *FCT-UNL, Caparica, Portugal, da.pires@campus.fct.unl.pt*

Barroso, Madalena; *LNEC, Lisboa, Portugal, mbarroso@lnec.pt*

Fontul, Simona; *LNEC/ FCT-UNL, Lisboa/ Caparica, Portugal, simona@lnec.pt*

Dimitrovová, Zuzana; *FCT-UNL, Caparica, Portugal, zdim@fct.unl.pt*

### RESUMO

O transporte ferroviário constitui o mais eficiente meio de transporte terrestre do ponto de vista energético e ambiental, pelo que é fundamental garantir o seu funcionamento em condições de segurança e conforto. A integração de geossintéticos nas soluções de reabilitação tem crescido substancialmente ao longo do tempo, nomeadamente a colocação de geogrelhas como elementos de reforço e/ou de estabilização de camadas granulares. Este trabalho tem como objetivo principal compilar os resultados obtidos por diversos autores sobre a colocação de geogrelhas na camada de balastro e a sua influência no comportamento da mesma. Os resultados mostraram que, de uma forma geral, o comportamento do balastro é melhorado com a colocação de geogrelhas e que a forma e as dimensões das aberturas da malha são parâmetros importantes. Neste trabalho, são também propostas algumas recomendações para a aplicação de geogrelhas na camada de balastro.

### ABSTRACT

The railway transportation is the most efficient way of terrestrial transport from an energetic and environmental point of view. It is essential to ensure that it operates safely and comfortably. The use of geosynthetics in the track rehabilitation solutions has grown substantially along the time, mainly the application of different geogrids with reinforcement and/ or stabilization functions of granular layers. The aim of this paper is to present and analyze the results of international researches related with the application of geogrids in the ballast layer and its influence on the ballast layer behavior. The results show that the use of geogrids in the ballast layer improved its behavior and that the aperture shape and size of the geogrids are important parameters to be taken into account. Based on the results, recommendations of geogrids application in the ballast layer are made.

### 1 - INTRODUÇÃO

Dada a importância do transporte ferroviário e a necessidade de reabilitação de vias existentes num contexto de estrangimento económico, soluções como a aplicação de geossintéticos representam opções de reabilitação que não implicam a interrupção do tráfego e promovem o melhoramento da via.

Os geossintéticos têm vindo a ser aplicados nas mais variadas obras com funções de separação entre materiais diferentes, filtragem, drenagem, reforço e estabilização. No âmbito deste trabalho, destacam-se as funções de reforço e de estabilização da camada de balastro, as quais têm sido asseguradas por geogrelhas.

A questão do reforço *versus* estabilização reveste-se, ainda, de grande atualidade. Refira-se, por exemplo, no final do ano de 2017, a *International Geosynthetics Society* (IGS) criou um grupo de trabalho dedicado ao tema da estabilização. Em ambas as funções, os geossintéticos proporcionam uma melhoria no comportamento mecânico dos materiais onde são aplicados. Contudo, as propriedades relevantes para assegurar o desempenho destas funções são diferentes. Para o reforço, a resistência à tração/extensão é a mais importante, enquanto que para a estabilização é a abertura da malha da geogrelha. Segundo Kawalec (2017) a estabilização conduz à redução do movimento das partículas do material granular, por via do confinamento das mesmas.

A contribuição das geogrelhas, no melhoramento das características da camada de balastro, tem sido objeto de vários estudos recentes. Neste trabalho, compilam-se os principais resultados obtidos nesses estudos. A seguir à presente introdução, apresentam-se os mecanismos de funcionamento da geogrelha na camada de balastro. A terceira secção é dedicada às principais metodologias utilizadas para avaliar o comportamento do balastro reforçado e/ou estabilizado com geogrelhas, atendendo à utilização de balastro novo, de balastro reciclado, bem como às condições prevaletentes (contaminação e saturação da camada de balastro). Os resultados são analisados em termos de: (i) assentamento da camada de

balastro, (ii) deslocamento horizontal do balastro, (iii) fragmentação das partículas de balastro, (iv) deflexão do carril e (v) relação entre a abertura da malha da geogrelha e a dimensão do balastro. Seguidamente, discutem-se a influência da localização da geogrelha na camada de balastro e a relação entre a abertura da malha e a dimensão do balastro. Por fim, propõem-se algumas recomendações de boas práticas construtivas com vista a otimizar a interação entre o balastro e a geogrelha e, dessa forma, melhorar o comportamento da camada de balastro.

## 2 - MECANISMOS DE FUNCIONAMENTO DA GEOGRELHA NA CAMADA DE BALASTRO

Os mecanismos principais de funcionamento da geogrelha na camada de balastro são o imbricamento (Fig. 1-a) e o confinamento (Fig. 1-b).

Quando os agregados de uma camada são compactados, as partículas granulares penetram parcialmente através das aberturas da geogrelha originando o efeito de imbricamento, pelo que a relação entre a abertura da malha das geogrelhas e a dimensão do agregado é muito importante. O imbricamento faz com que seja a geogrelha a resistir a esforços horizontais de tração impostos pelas solicitações (Kwan, 2006).

Decorrente do imbricamento existe o mecanismo de confinamento. No mecanismo de confinamento, o movimento das partículas de balastro, quando solicitadas, é minimizado devido à presença da geogrelha que funciona como uma restrição ao movimento. Este efeito não é um efeito ativo, mas reativo, visto que só ocorre com a aplicação de um carregamento e com a existência do mecanismo de imbricamento. Junto à geogrelha o movimento das partículas é diminuto devido ao mecanismo de confinamento. O confinamento reduz com o aumento da distância à geogrelha, até que apenas o atrito entre partículas contribui para resistir ao movimento (Kawalec, 2017).

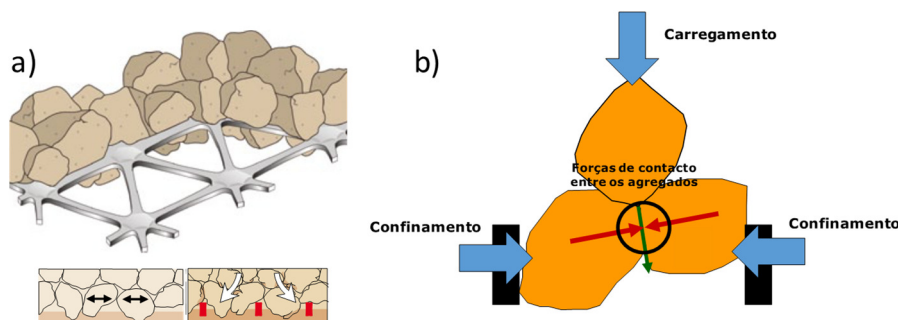


Figura 1 - Mecanismos de funcionamento da geogrelha na camada de balastro: a) Imbricamento (Tensor – Railway, 2012); b) Efeito de confinamento (adaptado de Kawalec, 2017)

## 3 - METODOLOGIAS USADAS PARA AVALIAR O COMPORTAMENTO BALASTRO/ GEOGRELHA

A Fig. 2 apresenta as principais metodologias utilizadas na literatura para estudar o comportamento da camada de balastro reforçada/ estabilizada com geogrelhas e a interação balastro/ geogrelha.

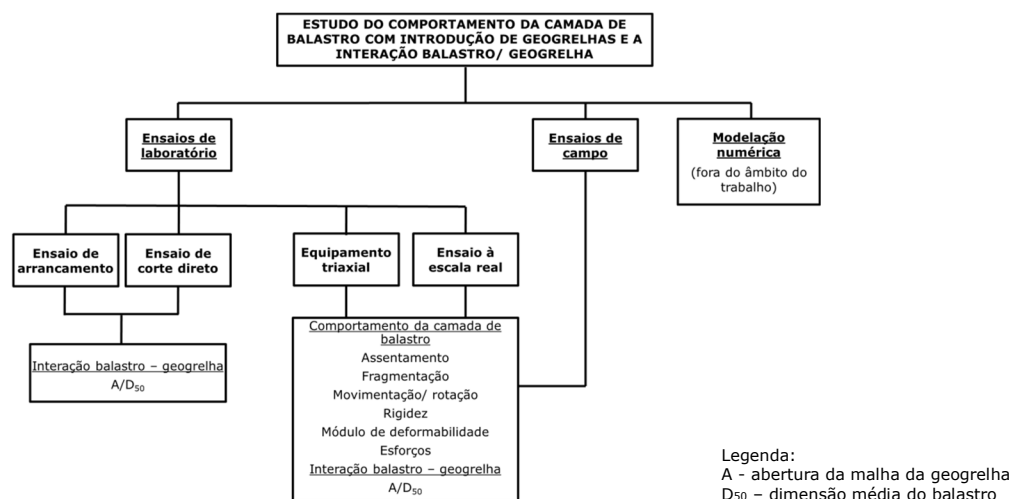


Figura 2 - Metodologias para estudar o comportamento da camada de balastro com a introdução de geogrelhas e a interação balastro/geogrelha

Conforme se pode observar na Fig. 2, estes estudos têm sido realizados com base em ensaios de laboratório, ensaios de campo e de modelação numérica. Os modelos numéricos não foram analisados no âmbito deste trabalho.

O Quadro 1 apresenta os parâmetros estudados e os ensaios utilizados pelos autores.

Quadro 1 - Parâmetros estudados, tipo de ensaio e respetivos autores

Parâmetros estudados	Tipo de ensaio	Referências
Assentamento da camada de balastro	- Laboratorial - <i>In situ</i>	Liu et al. (2016); Cook et al. (2015); Cook et al. (2013); Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2013b); Indraratna et al. (2010); McDowell e Stickley (2006); Indraratna et al. (2006)
Deslocamento horizontal do balastro	- Laboratorial - <i>In situ</i>	Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2013b); Indraratna et al. (2010)
Fragmentação do balastro	- Laboratorial	Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2013b); Indraratna et al. (2006); McDowell e Stickley (2006)
Rigidez da camada de balastro	- Laboratorial	Liu et al. (2016); McDowell e Stickley (2006)
Módulo de deformabilidade dinâmico da via	- <i>In situ</i>	Hornicek et al. (2017)
Esforços	- Laboratorial - <i>In situ</i>	Petriaev et al. (2017); Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2013b); Indraratna et al. (2010)
Rotações/ acelerações do balastro	- Laboratorial	Liu et al. (2016)
Resistência lateral da via	- Laboratorial - <i>In situ</i>	Esmaeili et al. (2017)
Deflexão do carril	- <i>In situ</i>	Petriaev (2017); Hornicek et al. (2017)
Parâmetros geométricos da via	- <i>In situ</i>	Hornicek et al. (2017)
Abertura da malha da geogrelha /Dimensão do balastro (A/D)	- Laboratorial	Kwan (2006) <sup>1</sup> ; Indraratna et al. (2013a) <sup>1</sup> Han et al. (2017) <sup>2</sup>




(1)  $D = D_{50}$

(2)  $D_{\min} \leq D \leq D_{\max}$ , sendo  $D_{\min}$  e  $D_{\max}$  as dimensões mínimas e máximas do balastro, respetivamente.

O assentamento da camada de balastro, a fragmentação do balastro, a rigidez da camada de balastro e o módulo de deformabilidade da via, os esforços, rotações e acelerações do balastro, a resistência lateral da via, a deflexão do carril, os parâmetros geométricos da via tem sido alvo de estudo, assim como a relação entre a abertura da malha da geogrelha e a dimensão do balastro.

O Quadro 2 apresenta as geogrelhas estudadas em função da forma e da dimensão da sua abertura e as respetivas referências.

Quadro 2 - Geogrelhas estudadas e respetivas referências

Geogrelhas estudadas		Referências
Forma da abertura	Abertura (mm)	
	36x36x36	Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2012)
	46x46x46	
	120*	Hornicek et al. (2017); Liu et al. (2016); Cook et al. (2015); Cook et al. (2013)
	32x32	Kwan (2006)
	33x33	Indraratna et al. (2012)
	38x38	Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2012)
	39x39	Petriaev et al. (2017); Petriaev (2017); McDowell e Stickley (2006)
	40x40	Esmaeili et al. (2017); Indraratna et al. (2013b);
	50x50	Petriaev et al. (2017); Petriaev (2017);
	65x65	Cook et al. (2013); Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2012); McDowell e Stickley (2006); Kwan (2006)
	32x31	Han et al. (2017)
	36x24	Indraratna et al. (2012)
	35x45	Petriaev et al. (2017); Petriaev (2017);
	40x27	Indraratna et al. (2006)
	44x27	Indraratna et al. (2010)
	44x42	Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2012)
	70x110	Indraratna et al. (2012)

Legenda: \*- dimensão do hexágono elementar

Conforme se pode observar, foram estudadas geogrelhas com malhas triangulares, quadrangulares e retangulares. As dimensões das aberturas estudadas variaram entre 33x33mm e 70x110mm.

O Quadro 3 apresenta as condições do balastro (novo ou reciclado) e da camada de balastro (contaminada ou saturada) estudadas e as respectivas referências.

Quadro 3 - Condições do balastro e da camada de balastro estudadas

Fase	Balastro	Referências
Colocação em obra	Novo	Hornicek et al. (2017); Liu et al. (2016); Cook et al. (2015); Cook et al. (2013); Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2013b); Esmaeili et al. (2017); Indraratna et al. (2010)
	Reciclado	Petriaev et al. (2017); Petriaev (2017); Indraratna et al. (2010); Indraratna et al. (2006); Esmaeili et al. (2017)
Exploração	Contaminado	Indraratna et al. (2013b)
	Saturado	Indraratna et al. (2006); McDowell e Stickley (2006)

## 4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1 - Generalidades

A nomenclatura utilizada nas secções seguintes para identificar o tipo de geossintético utilizado na camada de balastro é a que se apresenta no Quadro 4.

Quadro 4 - Nomenclatura utilizada para identificar as geogrelhas e a sua localização no balastro

Tipo de geossintético	Forma da abertura	Dimensão da abertura (mm)	Localização no balastro (mm)
<b>G</b> : geogrelha	<b>Q</b> : quadrangular	- Nas retangulares assume a forma <b>a.b</b> ; - Nas quadrangulares assume a forma <b>a</b> ;	- A localização no balastro assume a forma <b>c</b> ; - Quando existe a colocação de mais do que uma geogrelha em simultâneo, assume a forma <b>c+d</b> ;
<b>Gc</b> : geocompósito constituído por geotêxtil e geogrelha	<b>R</b> : retangular <b>T</b> : triangular	- Nas triangulares assume a forma <b>a</b> ; - <b>a</b> e <b>b</b> são as dimensões da abertura.	- <b>c</b> e <b>d</b> são as localizações da geogrelha medidas a partir da interface.
Outros:	Nas geogrelhas triaxiais, quando aparece <b>120</b> , refere-se ao hexágono elementar; <b>OG</b> : camada de balastro novo sem geogrelha; <b>+R</b> : geogrelha com maior resistência/ <b>-R</b> : geogrelha menor resistência; <b>(A)</b> : balastro mais resistente/ <b>(B)</b> : balastro menos resistente; <b>Reciclado</b> : balastro reciclado; <b>40% contaminado</b> : camada de balastro 40% contaminada; <b>Saturado</b> : partículas de balastro saturadas; <b>Areia</b> : camada de areia na interface.		

Por exemplo: **GQ(+R)65/100+200(A)** representa uma geogrelha (**G**) com uma malha quadrada (**Q**) mais resistente (**+R**) de 65mm (**65**) localizada simultaneamente a 100 e a 200mm da interface (**100+200**), numa camada com balastro mais resistente (**(A)**).

Na localização da geogrelha na camada de balastro, quando é referida "interface", refere-se à transição entre a camada de balastro e as camadas subjacentes.

Os parâmetros analisados neste trabalho são descritos de seguida, sendo os resultados obtidos apresentados em termos de melhorias, que foram calculadas utilizando a Eq. 1.

$$M = \frac{S_{sem\ geossintético} - S_{com\ geossintético}}{S_{sem\ geossintético}} \times 100 \quad [1]$$

Onde:

$M$  – Melhoria do parâmetro  $S$  com o reforço/ estabilização (%);

$S_{sem\ geossintético}$  – Valor do parâmetro em estudo para a situação não reforçada/ estabilizada;

$S_{com\ geossintético}$  – Valor do parâmetro em estudo para a situação reforçada/ estabilizada.

## 4.2 - Assentamento da camada de balastro

A Fig. 3 compila os resultados obtidos para a redução do assentamento da camada de balastro reforçada/estabilizada com geogrelhas. As geogrelhas utilizadas foram biaxiais, com uma malha quadrada de 65mm, triaxiais, com um hexágono elementar de 120mm e uma malha triangular de 36mm.

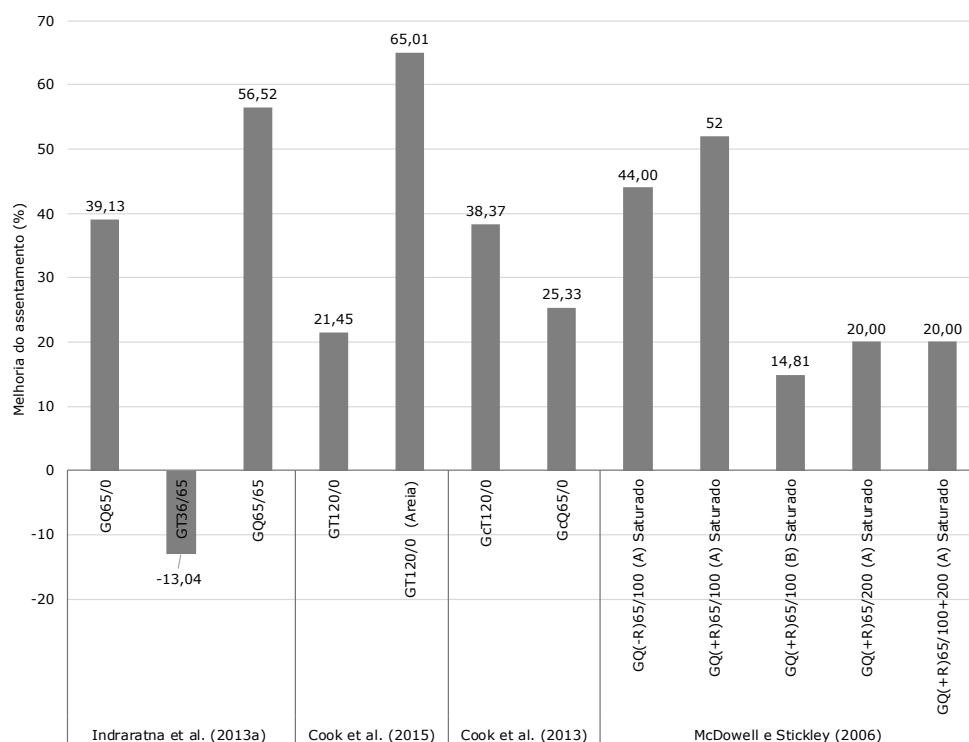


Figura 3 - Resultados obtidos: melhoria do assentamento da camada de balastro

Com base na Fig. 3, verifica-se que colocação de geogrelhas na camada de balastro contribuiu, de uma forma geral, para uma redução do seu assentamento, à exceção do resultado obtido por Indraratna et al. (2013a). Verificou-se, neste caso, que com a colocação da geogrelha GT36/65 o assentamento piorou em 13%, o que foi atribuído ao mau imbricamento entre o balastro e a geogrelha, salientando a importância da relação entre a abertura da malha da geogrelha e a dimensão do balastro (A/D).

Relativamente ao tipo de geogrelha, a aplicação de geogrelhas biaxiais, com uma malha quadrada de 65mm, na camada de balastro contribuiu para uma melhoria média de 34%, enquanto que a colocação de geogrelhas triaxiais, com hexágonos elementares de 120mm, contribuiu para uma melhoria média de 42%.

Constatou-se, também, que a saturação das partículas de balastro afeta o comportamento da camada de balastro, na medida em que a presença de água funciona como um lubrificante, reduzindo o atrito entre partículas (McDowell e Stickley, 2006). Consequentemente, a melhoria do assentamento da camada de balastro quando reforçada/estabilizada com geogrelha é, nestes casos, mais reduzida, sendo em média de 27%.

Cook et al. (2015) observou que a colocação de uma camada de 20cm de areia entre a geogrelha e a camada subjacente contribuiu para uma redução de 65% do assentamento.

Indraratna et al. (2013b) verificou que a eficácia da geogrelha reduz com o aumento da contaminação do balastro. Os finos acumulam-se nas aberturas da geogrelha, reduzindo a sua abertura efetiva. Para uma contaminação superior a 40% a eficácia da geogrelha reduziu de 35% (não contaminado) para 18%.

Os resultados apresentados por diferentes autores indicam que a colocação de uma geogrelha na camada de balastro reciclado contribuiu para uma redução média do assentamento de 18%. Quando colocada numa camada de balastro novo, verificou-se uma melhoria média de 35%.

## 4.3 - Deslocamento horizontal do balastro

A Fig. 4 resume as melhorias obtidas no deslocamento horizontal do balastro com a colocação de geogrelhas.

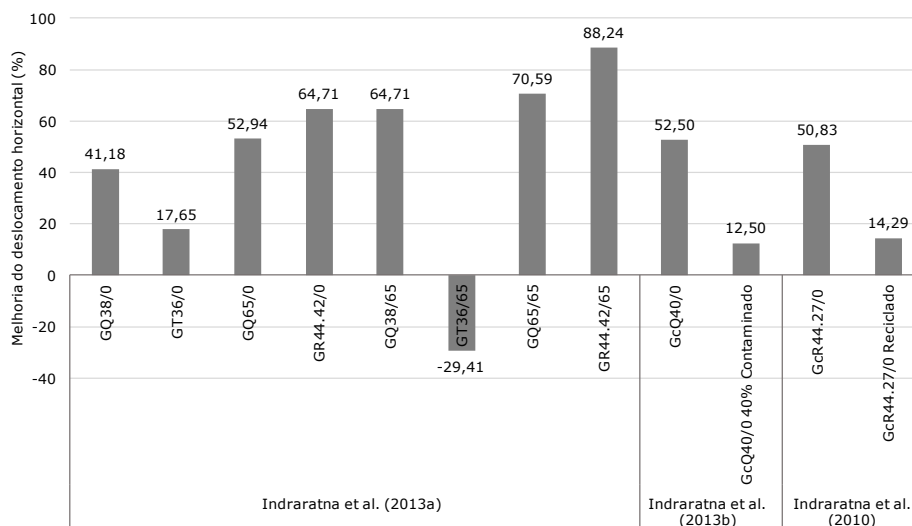


Figura 4 - Resultados obtidos para o deslocamento horizontal do balastro

Como se pode observar na Fig. 4, de um modo geral, a colocação de geogrelhas na camada de balastro reduziu o deslocamento horizontal do balastro, exceto no caso da colocação da geogrelha *GT36/65*, estudada por Indraratna et al. (2013a), que foi atribuído ao mau imbricamento entre o balastro e a geogrelha, à semelhança do parâmetro anterior.

A colocação de geogrelhas contribuiu para uma melhoria média do deslocamento horizontal de 56% em camada de balastro novo e de 14% em balastro reciclado. Isto sugere que existe uma melhor interação entre o balastro novo e a geogrelha.

Indraratna et al. (2013b) verificou que o deslocamento horizontal do balastro, apesar de melhorar com a colocação da geogrelha, aumenta com a contaminação da camada. Os finos funcionam como lubrificante, reduzindo o atrito entre as partículas de balastro. A partir de 40% de contaminação as melhorias no deslocamento horizontal tornaram-se muito reduzidas.

Esmaeili et al. (2017) estudou o deslocamento horizontal do balastro com a introdução de geogrelhas, apresentando os resultados em termos de resistência lateral da via. Verificou que a colocação de geogrelhas na camada de balastro contribuiu para uma melhoria de 36% na resistência lateral da via.

#### 4.4 - Fragmentação do balastro

A Fig. 5 apresenta as melhorias da fragmentação com a colocação de geogrelhas na camada de balastro obtidas por Indraratna et al. (2013a). Para este efeito, o autor utilizou o *Ballast Breakage Index* (BBI), que consiste no cálculo de áreas entre curvas granulométricas antes e após o carregamento e na definição de um limite máximo de fragmentação.

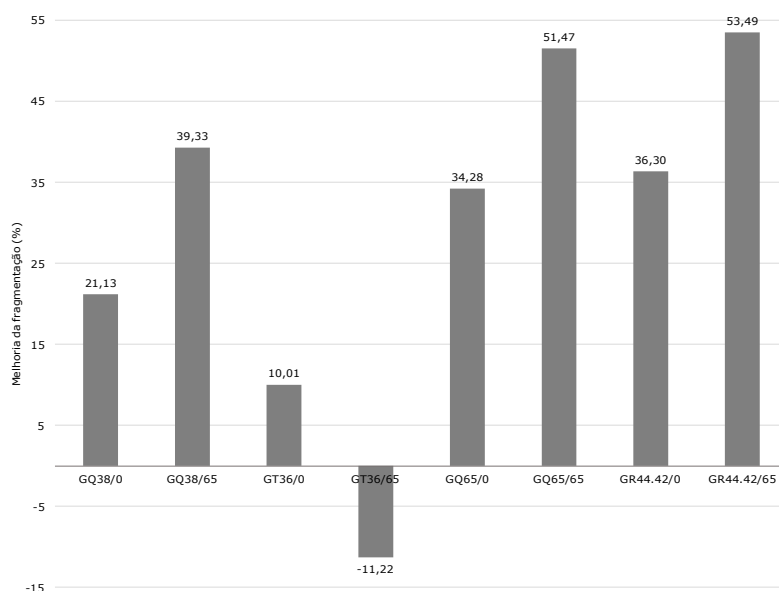


Figura 5 – Melhorias obtidas na fragmentação do balastro

Com base na Fig. 5, verifica-se que a fragmentação do balastro é reduzida com a colocação de geogrelhas. De salientar que, a colocação de uma geogrelha na interface e a 65mm acima desta resulta numa melhoria de 25% e 48%, respetivamente. À semelhança dos resultados anteriores, a introdução da geogrelha *GT36/65* agravou a fragmentação devido ao fraco imbricamento entre o balastro e a geogrelha.

#### 4.5 - Deflexão do carril

A medição da deflexão no topo do carril foi feita em campo antes e após a colocação de geogrelhas. A Fig. 6 apresenta as melhorias na deflexão obtidas com a introdução de geogrelhas na camada de balastro.

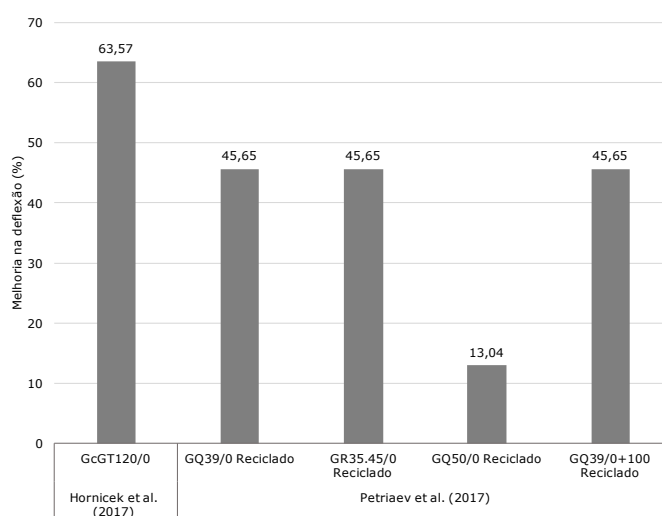







Figura 6 – Melhorias obtidas na deflexão do carril

Verificou-se que a colocação de geogrelhas na interface reduz as deflexões do carril aquando a passagem do material circulante. A colocação de um geogrelha triaxial com um hexágono elementar de 120mm contribuiu para uma redução de 64% da deflexão do carril e a colocação de uma geogrelha com aberturas quadrangulares de 39mm uma redução de 46%, sugerindo a importância do papel das geogrelhas no comportamento da camada de balastro.

#### 4.6 - Síntese de resultados

Os Quadros 5 e 6 apresentam de forma resumida as melhorias médias obtidas com a aplicação de geogrelhas na camada de balastro. O Quadro 5 apresenta as melhorias em função do tipo de análise (laboratório ou campo) e da forma da abertura da malha da geogrelha, salientando as geogrelhas mais utilizadas em ferrovias.

Quadro 5 - Quadro resumo das melhorias com a aplicação de geogrelhas na camada de balastro

Parâmetro	Melhorias com a aplicação de geogrelha (%)		Melhorias tendo em conta a forma da abertura da malha da geogrelha (%)			Melhorias com geogrelhas com aplicação prática em ferrovias (%)	
	Laboratório	Campo				 65x65mm	 Hexágono elementar de 120mm
Assentamento da camada de balastro	10 a 65 (33)	5 a 35 (20)	5 a 61 (30)	15 a 57 (33)	17 a 65 (36)	15 a 57 (34)	21 a 65 (42)
Deslocamento horizontal do balastro	18 a 88 (57)	14 a 51 (32)	13 a 88 (55)	41 a 71 (56)	#	53 a 71 (62)	*
Resistência lateral da via	8 a 40 (36)	34 a 42 (38)	*	8 a 42 (31)	*	*	*
Fragmentação do balastro	0,7 a 53 (25)	*	0,7 a 53 (34)	2 a 51 (19)	#	2 a 51 (18)	*
Deflexão do carril	*	43	46	30	64	*	64

Legenda: \*- não foi estudado pelos autores; #- amostra não representativa; ( ) – valor médio

Constata-se que, de uma forma geral, as melhorias foram mais significativas com a colocação de geogrelhas triaxiais com um hexágono elementar de 120mm na camada de balastro do que com as geogrelhas biaxiais com uma malha de 65mm, para todos os parâmetros indicados no Quadro 5.

O Quadro 6 apresenta as melhorias obtidas com a colocação de geogrelhas em função das características do balastro, relativamente à construção da camada com balastro novo ou reciclado, bem como com as alterações destas durante a exploração (contaminação e saturação).

Quadro 6 - Melhorias tendo em conta o tipo de balastro e as condições da camada de balastro com a aplicação de geogrelhas

Parâmetro	Colocação em obra		Exploração	
	Novo	Reciclado	40% contaminado	Saturado
Assentamento da camada de balastro	15 a 65 (35)	5 a 36 (18)	18	15 a 65 (27)
Deslocamentos horizontais do balastro	18 a 88 (56)	14	13	*
Resistência lateral da via	8 a 40 (36)	34 a 42 (38)	*	*
Fragmentação do balastro	0,7 a 54 (20)	42 a 50 (46)	6,25	2 a 50 (18)
Deflexão do carril	64	13 a 46 (38)	*	*

Legenda: \*- não foi estudado pelos autores; ( ) – valor médio

No que diz respeito à fase de construção da camada, com a colocação de geogrelhas, verifica-se que, de uma forma geral, ocorreram melhorias dos parâmetros incluídos no Quadro 6, quer no caso do balastro novo, quer no balastro reciclado.

No que se refere à fase de exploração, ocorreu igualmente uma melhoria nos parâmetros estudados.



## 5 - INTERFACE BALASTRO-GEOGRELHA

### 5.1 - Influência da localização da geogrelha

A influência da localização da geogrelha na camada de balastro tem sido estudada por diversos autores, tal como se pode ver no Quadro 7. Os parâmetros analisados são também indicados no referido quadro.

Quadro 7 - Influência da localização da geogrelha

Localização a partir da interface, de acordo com a Fig. 7 (mm)	Melhorias				Referências
	Assentamento (%)	Fragmentação do balastro (%)	Resistência lateral da via (%)	Deslocamento horizontal (%)	
0	5 a 65 (30)	0,7 a 50 (26)	*	13 a 65 (38)	Petriaev et al. (2017); Petriaev (2017); Hornicek et al. (2017); Cook et al. (2013); Cook et al. (2015); Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2013b); Indraratna et al. (2010); Indraratna et al. (2006)
65/ 1,23D <sub>máx</sub>	48 a 61 (55)	39 a 54 (48)	*	65 a 88 (75)	Indraratna et al. (2013a)
100/ 1,59D <sub>máx</sub>	15 a 52 (33)	4 a 8 (6)	8	*	Esmaeili et al. (2017); McDowell e Stickley (2006)
200 3,17D <sub>máx</sub>	20	2	31 a 34 (33)	*	Esmaeili et al. (2017); McDowell e Stickley (2006)
100+200	20	#	40 a 42 (41)	*	Esmaeili et al. (2017); McDowell e Stickley (2006)

Legenda: \*- não foi estudado na bibliografia; #- amostra não representativa; ( ) - valor médio;  
D<sub>máx</sub> - dimensão máxima do balastro

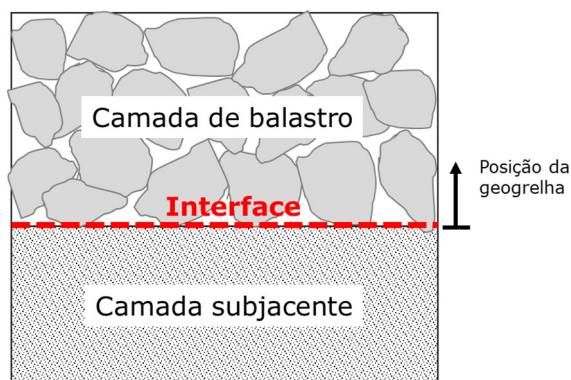


Figura 7 – Localização esquemática da geogrelha na camada de balastro

Verifica-se que, em termos de assentamento, a colocação de uma geogrelha a 65mm da interface melhorou em 55% o assentamento. A colocação da geogrelha a 100mm da interface também contribuiu com melhorias no assentamento do balastro, embora mais reduzidas (33%). A localização da geogrelha que mais contribuiu para um menor assentamento da camada de balastro situa-se entre a interface e no máximo a 1,23-1,59D<sub>máx</sub> (onde D<sub>máx</sub> é a dimensão máxima do balastro) desta. A colocação de duas geogrelhas em simultâneo, a 100 e a 200mm, e apenas a 200mm da interface, contribuiu com melhorias menos significativas em termos de assentamento.

Relativamente à fragmentação, a que teve melhor desempenho foi a localizada a 65mm da interface.

No que se refere à resistência lateral da via, verifica-se que quanto mais afastada da interface, melhor é a estabilização lateral da via. A colocação de duas geogrelhas em simultâneo melhorou em 41% a resistência lateral da via.

Por fim, no que diz respeito ao deslocamento horizontal do balastro, a colocação de uma geogrelha na interface e a 65mm desta melhorou este em 38% e 75%, respetivamente. Isto sugere que tanto as partículas de balastro acima da geogrelha como aquelas que situam abaixo desta ficam imbricadas nas aberturas da geogrelha, melhorando o imbricamento e o confinamento.

## 5.2 - Interação geogrelha-balastro

A interação geogrelha-balastro pode ser analisada tendo em conta o coeficiente de eficiência da resistência ao corte ( $\alpha$ ). Este coeficiente é obtido pelo quociente entre a resistência ao corte do balastro com geogrelha ( $\tau_{\text{geogrelha-balastro}}$ ) e a resistência ao corte do balastro sem geogrelha ( $\tau_{\text{balastro-balastro}}$ ). Quanto maior for o valor de  $\alpha$ , maior é a eficácia da geogrelha: sempre que  $\alpha > 1$  ocorre um melhoramento da resistência e quando  $\alpha < 1$  não ocorre imbricamento do balastro na geogrelha (Indraratna et al., 2012).

A dimensão das partículas do balastro e das aberturas da geogrelha tomam assim uma elevada importância na resistência ao corte. A resistência ao corte do conjunto balastro-geogrelha depende de dois fatores: da resistência ao corte das partículas imbricadas na geogrelha e a resistência ao corte entre as partículas e a superfície da geogrelha. As suas magnitudes dependem do grau de imbricamento e da área de contato entre as partículas e a superfície da geogrelha (Han et al., 2017):

- Se o balastro tiver dimensões superiores às aberturas da malha da geogrelha não a atravessa, ficando apoiado nela (Fig. 8-a). O comportamento da geogrelha seria, neste caso, análogo ao de uma geomembrana ou de um geotêxtil;
- Quando as dimensões do balastro se aproximam da dimensão das aberturas da malha da geogrelha, este atravessa as suas aberturas, ficando imbricado nestas (Fig. 8-b). As barras transversais e longitudinais da geogrelha confinam o balastro e este efeito de confinamento propaga-se às partículas vizinhas;
- Quando as dimensões do balastro são demasiado pequenas face às aberturas da geogrelha, este passa totalmente através delas (Fig. 8-c), podendo ficar mais que uma partícula imbricada na mesma abertura. Neste caso, o mecanismo de imbricamento é fraco.

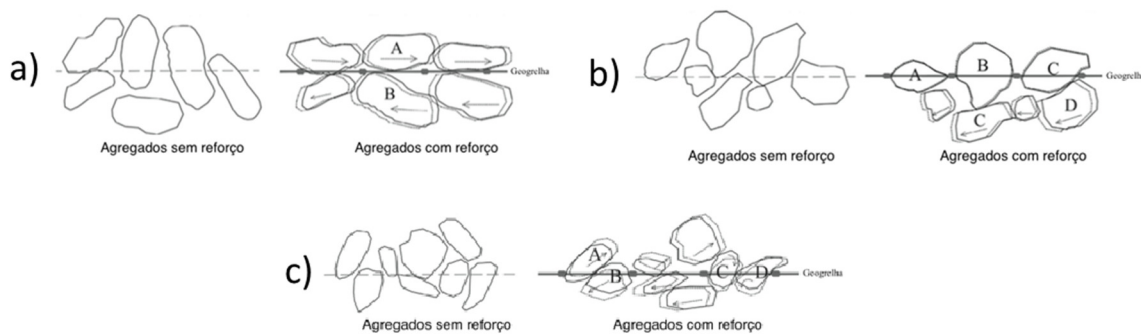


Figura 8 - Agregados com: a) dimensão superior, b) dimensão próxima e c) dimensão muito inferior à abertura da geogrelha (adaptado de Han et al., 2017)

Kwan (2006) referiu que a importância da relação A/D ultrapassa a importância da rigidez e da resistência da geogrelha. Verificou que quando se compara uma geogrelha com aberturas menores e uma maior resistência com outra com aberturas maiores e uma resistência menor, a força de arrancamento da segunda é superior à da primeira. Sempre que ocorre uma boa interação geogrelha-agregado o fator rigidez apenas contribui para que haja menores deformações para esforços mais elevados. Por si só, a rigidez da geogrelha não melhora o comportamento da camada sem que ocorra um bom imbricamento. Contudo, a rigidez e a resistência da geogrelha não deve ser descurada na medida em que barras mais grossas contribuem para um melhor confinamento.

Vários autores sugeriram relações entre a abertura da malha da geogrelha e a dimensão do balastro (A/D), consoante o tipo de geogrelha, nomeadamente:

- Kwan (2006) sugere que ocorre um bom efeito de imbricamento, em geogrelhas biaxiais, se  $A/D_{50} \geq 1,6$ ;
- Indraratna et al. (2012) referiu que a abertura mínima recomendável da malha de uma geogrelha biaxial é  $0,95D_{50}$  e a abertura máxima  $2,5D_{50}$ , referindo que a relação ótima será  $1,15 \leq A/D_{50} \leq 1,30$ ;
- Indraratna et al. (2013a) sugeriu que se  $A/D_{50} > 0,95$  a geogrelha deverá ser colocada a 65mm da interface e se  $A/D_{50} < 0,95$  deverá ser colocada na interface.
- Han et al. (2017) sugeriu a relação  $1,30 \leq A/D \leq 1,71$ , para as geogrelhas biaxiais, e a relação  $1,08 \leq A/D \leq 1,43$ , para as geogrelhas triaxiais, sendo D igual às dimensões mínimas e máximas do balastro, no caso das geogrelhas triaxiais, A igual ao diâmetro do círculo inscrito no triângulo.

### 5.3 - Recomendações de boas práticas na utilização de geogrelhas na camada de balastro

A aplicação de geogrelhas na camada de balastro parece contribuir, sobretudo, na redução do seu assentamento. Os aspetos mais relevantes para a redução do assentamento são a abertura da malha da geogrelha (forma e dimensão), a sua localização na camada de balastro e a dimensão média do agregado. Assim, com base nos resultados obtidos pelos autores, de forma a maximizar a interação entre o balastro e a geogrelha e melhorar o comportamento da camada de balastro, sugerem-se as seguintes boas práticas de colocação de geogrelhas:

- Quanto à localização, sugere-se que as geogrelhas sejam colocadas entre a interface balastro/camada subjacente e  $1,23-1,59D_{máx}$  acima desta;
- Quanto à abertura da malha da geogrelha e a dimensão do balastro, a relação  $A/D_{50}$  deve situar-se entre 1,15 e 1,71, para uma geogrelha biaxial, e 1,08 e 1,43, para uma geogrelha triaxial.

É, ainda, necessário ter atenção que:

- Uma proporção desajustada  $A/D_{50}$  pode não melhorar, e em caso extremo piorar, o comportamento da camada de balastro;
- Ao longo do tempo e no decorrer da exploração da via, pode ocorrer contaminação da camada de balastro que reduz a eficácia da geogrelha, pelo que a monitorização da via é muito importante.

## 6 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feita a compilação dos trabalhos apresentados pelos diversos autores sobre a colocação de geogrelhas na camada de balastro e a influência no comportamento da mesma. Foram estudados vários parâmetros, nomeadamente o assentamento da camada de balastro, o deslocamento horizontal do balastro, a fragmentação do balastro, a resistência lateral da via e a deflexão do carril. Teve-se em consideração as características do balastro relacionadas com a construção da camada (balastro novo ou reciclado) e a alteração deste durante a fase de exploração (contaminação e saturação). Foi, também, analisada a influência da localização da geogrelha na camada de balastro e a interação balastro-geogrelha. Por último, foram feitas algumas recomendações de boas práticas construtivas para a aplicação de geogrelhas na camada de balastro de vias férreas.

Os resultados mostraram que a introdução de geogrelhas com a função de reforço/ estabilização na camada de balastro melhorou o seu comportamento. De uma forma geral, a colocação de geogrelhas triaxiais com hexágonos elementares de 120mm contribuiu com melhorias mais significativas no comportamento da camada de balastro, sobretudo em termos de assentamento. Comparando o assentamento da camada de balastro com e sem geogrelha, verificou-se que com geogrelhas triaxiais com um hexágono elementar de 120mm melhorou, em média, 42% e 34% com geogrelhas biaxiais com uma malha de 65mm.

Os resultados mostraram que as geogrelhas localizadas entre a interface, e no máximo a  $1,23-1,59D_{máx}$  desta, foram as que mais contribuíram para a melhoria do comportamento da camada de balastro.

A colocação de geogrelhas em balastro novo produziu melhorias mais significativas do que quando colocadas em balastro reciclado.

Verificou-se que o comportamento da camada de balastro melhora quando a relação  $A/D_{50}$  se situa entre 1,15 e 1,71, para uma geogrelha biaxial, e 1,08 e 1,43, para uma geogrelha triaxial.

A validação de que de facto estas melhorias são devidas ao imbricamento carece de uma atenção especial, assim como a sua quantificação.

## REFERÊNCIAS

Cook, J., Belyaev, VS. e Ashpiz, ES. (2015) - Comparative full-scale cyclic loading trials on track bed with and without geogrid stabilization. Proceedings Railway Engineering.

Cook, J. e Hornicek, L. (2013) - The performance of new generation geogrids within trackbed under cyclic railway loading. Conference: Railway Engineering 2013.

- Esmaili, M., Zakeri, Jabbar. e Babaei, M. (2017) - Laboratory and field investigation of the effect of geogrid-reinforced ballast on railway track lateral resistance. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 45, pp. 23-33.
- Han, B., Ling, J., Shu, X., Gong, H. e Huang, B. (2017) - Laboratory investigation of particle size effects on the shear behavior of aggregate-geogrid interface. *Construction and Building Materials*, vol. 158, pp. 1015-1025.
- Hornicek, L., Brestovsky, P. e Jasansky, P. (2017) - Application of geocomposite placed beneath ballast bed to improve ballast quality and track stability. *IOP Conference: Materials Science and Engineering*, vol. 236.
- Indraratna, B., Hussaini, S. e Vinod, J. (2012) - On the shear behavior of ballast-geosynthetic interfaces. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 35, pp. 305-312.
- Indraratna, B., Hussaini, S. e Vinod, J. (2013a) - The lateral displacement response of geogrid-reinforced ballast under cyclic loading. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 39, pp. 20-29.
- Indraratna, B., Khabbaz, H., Salim, W. e Christie, D. (2006) - Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilization. *Ground Improvement*, vol. 3, pp. 91-101.
- Indraratna, B., Ngo, N. e Rujikiatkamjorn, C. (2013b) - Deformation of coal fouled ballast stabilized with geogrid under cyclic load. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 139, pp. 1275-1289.
- Indraratna, B., Nimbalkar, S. Christie, D. e Rujikiatkamjorn, C. (2010) - Field assessment of the performance of a ballasted rail track with and without geosynthetics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 136, pp. 907-916.
- Kawalec, J. (2017) - Stabilisation of unbound aggregate by geogrids for transport infrastructure applications. *Improvement, Reinforcement and Rehabilitation of Transport Infrastructures: 1st Seminar on Transportation Geotechnics*, pp. 36-37.
- Kwan, C. (2006) - *Geogrid reinforcement of railway ballast*. Dissertação de Doutorado, The University of Nottingham.
- Liu, S., Huang, H., Qiu, T. e Kwon, J. (2016) - Effect of geogrid on railroad ballast studied by "smartrock". *Transportation Research Board Annual Meeting*.
- McDowell, G. e Stickley, P. (2006) - Performance of geogrid-reinforced ballast. *Ground Engineering*, vol. 39, pp. 26-30.
- Petriaev, A. (2017) - Stress response analyses of ballasted rail tracks, reinforced by geosynthetics. *Procedia Engineering*, vol. 189, pp. 660-665.
- Petriaev, A. e Konon, A. (2017) - Performance of ballast layer reinforced with geosynthetics in terms of heavy axle load operation. *Procedia Engineering*, vol. 189, pp. 654-659.
- Tensar Portugal (2012) - *Caminhos de Ferro - Estabilização mecânica das camadas de balastro e sub-balastro*. <http://www.tensar.pt/FileDownload.ashx?id=%7bA2DEEDE8-FD43-440F-813C-57D7D8C9A324%7d>, acessado a 25-10-2017.