



António da Costa Lança

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Análise numérica de uma via-férrea reforçada com geogrelha

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientador: Doutora Zuzana Dimitrovová, Professora Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Doutora Madalena Barroso, Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Doutor Rodrigo M. Gonçalves, Professor Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Arguentes: Doutora Simona Fontul, Professora Auxiliar Convidada, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Vogais: Doutora Zuzana Dimitrovová, Professora Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Outubro de 2018

INDICAÇÃO DE DIREITOS DE CÓPIA

“Copyright” António da Costa Lança, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

À Professora Zuzana Dimitrovová e à Engenheira Madalena Barroso, por toda a orientação, disponibilidade e paciência ao longo deste trabalho.

Ao Kung-Fu Kenny e à Arya Maria, fiéis amigos de quatro patas, por toda a companhia e saudáveis distrações.

A todos os colegas da vida académica que, de alguma forma, contribuíram para chegar até este ponto.

A todos os meus amigos.

A toda a minha família, em especial aos meus pais, Florival e Paula, por todo o amor e dedicação.

Resumo

A utilização da via-férrea tem perdido alguma preponderância nas últimas décadas, devido ao crescimento de outros meios de transporte, como o rodoviário e o aéreo. Contudo, as maiores emissões de CO₂ destes meios de transporte, quando comparados com o ferroviário, aliadas ao fato de o maior número de fatores percursoros de acidentes em vias-férreas serem as deformações na via e, carris danificados, constituem motivos mais que suficientes para nos debruçarmos sobre formas de aumentar a eficiência destas vias e, diminuir ao mesmo tempo, os custos associados à sua construção e manutenção.

É neste contexto que surge a utilização de geogrelhas para a função de reforço e/ou estabilização de vias-férreas. Neste trabalho, a influência da colocação de geogrelhas na estabilização de vias-férreas degradadas, foi estudada a partir da criação de modelos numéricos com recurso ao *software* LS-DYNA. Este modelo foi criado com o objetivo de estudar: a) deslocamentos horizontais e verticais dos carris; b) deslocamentos horizontais da camada de balastro.

Com este objetivo foram então criados quatro modelos distintos: um modelo de via-férrea, utilizado como referência, sem degradação da camada de balastro nem geogrelha; um modelo sem degradação mas com geogrelha; um modelo com degradação mas sem geogrelha; um modelo com degradação e geogrelha.

Verificou-se que a presença da geogrelha não introduziu diferenças significativas nos deslocamentos verticais dos carris, tanto na via com degradação, como na via sem degradação. Mas por outro lado e, apesar de algumas limitações na criação dos modelos de elementos finitos, a introdução da geogrelha, nos modelos com e sem degradação da camada de balastro, revelou-se influente na diminuição dos deslocamentos horizontais, tanto dos carris como da camada de balastro, contribuindo assim para a estabilização lateral da via-férrea.

Foram também feitas sugestões para futuros desenvolvimentos no campo da modelação numérica de vias-férreas degradadas e reforçadas com geogrelhas.

Termos Chave: *Via-férrea, geogrelha, LS-DYNA, degradação do balastro, estabilização horizontal, modelação numérica*

Abstract

In the last decades the railway transport has lost some preponderance, due to the increased usage of road and air transportation. But since these means of transportation have larger CO₂ emissions than the railway and, because the highest number of accidents in railway tracks are caused by track buckles and broken rails, we find more than enough reasons to study ways to increase the efficiency of the railway and, to diminish the costs of construction and maintenance works.

It is in this context that arises the use of geogrids in reinforcement and/or stabilization of railways. In this work, the use of geogrids in partially degraded tracks, was analyzed through numerical modeling, using the software LS-DYNA. The model was created to see the influence of the geogrid in: a) vertical and horizontal displacements of the rail; b) horizontal displacements of the ballast layer.

For this purpose, 4 different models were created: an original model, with no degradation of the ballast layer; a model with no degradation but with a geogrid; a model with degradation of the ballast layer but no geogrid; a model with degradation of the ballast layer and reinforced with the geogrid.

The presence of the geogrid did not introduce noticeable differences in the rail vertical displacements, both in the degraded and not degraded models. But on other hand, and despite some limitations in the creation of the models, the presence of the geogrid diminished the horizontal displacements of the rail and the ballast layer, contributing for the stabilization of the track.

In addition, some suggestions for future developments were made.

Keywords: *Railway track, geogrid, LS-DYNA, ballast degradation, horizontal stabilization, numerical modeling*

Índice

Resumo V

Abstract VII

Índice IX

Índice de figuras	XII
Índice de tabelas	XVI
Lista de abreviaturas utilizadas	XVIII
Lista de símbolos utilizados.....	XVIII
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento do Tema	1
1.2. Método dos elementos finitos e <i>software</i>	3
1.3. LS-DYNA	5
1.4. Objetivos.....	5
1.5. Estrutura do Trabalho	5
1.6. Publicações relacionadas	6
2. Via-férrea	7
2.1. Introdução.....	7
2.2. Via-férrea balastrada	7
2.3. Superestrutura	9
2.3.1. Carris	9
2.3.2. Sistemas de fixação.....	10
2.3.3. Palmilhas	11
2.3.4. Travessas	12
2.3.5. Balastro.....	13
2.4. Subestrutura	14
2.4.1. Sub-balastro	14
2.4.2. Fundação.....	15
2.5. Fatores de degradação da via-férrea.....	15

2.5.1.	Forças aplicadas na via	15
2.5.2.	Degradação da camada de balastro	17
2.5.3.	Assentamentos e deterioração da via	18
2.6.	Resumo do capítulo	19
3.	Geossintéticos	21
3.1.	Introdução	21
3.2.	Desenvolvimento dos geossintéticos	21
3.3.	Tipos de geossintéticos	22
3.4.	Funções dos geossintéticos	24
3.5.	Aplicações dos geossintéticos em vias-férreas	27
3.5.1.	Mecanismos de funcionamento das geogrelhas	28
3.6.	Propriedades dos geossintéticos	31
3.6.1.	Espessura	32
3.6.2.	Resistência à tração	32
3.7.	Resumo do capítulo	35
4.	Revisão bibliográfica	37
4.1.	Introdução	37
4.2.	Utilização do LS-DYNA como ferramenta para o estudo da via-férrea	37
4.3.	Principais estudos numéricos realizados com geossintéticos	39
4.4.	Resumo do Capítulo	42
5.	Modelação Numérica	45
5.1.	Introdução	45
5.2.	Caso de estudo	45
5.2.1.	Descrição do caso de estudo	45
5.2.2.	LS-DYNA e ANSYS	52
5.2.3.	Malha de elementos finitos	54
5.2.4.	Propriedades do <i>bogie</i> modeladas	55
5.2.5.	*RAIL_TRACK e *RAIL_TRAIN	56
5.2.6.	Condições de fronteira	56
5.2.7.	Simplificações e limitações na criação do modelo	60

5.2.8.	Trabalhos prévios de validação dos modelos tridimensionais	62
5.3.	Propriedades da geogrelha modeladas	63
5.4.	Análise dos resultados.....	64
5.4.1.	Deslocamentos verticais do carril	64
5.4.2.	Deslocamentos horizontais do carril	66
5.4.3.	Deslocamentos horizontais da camada de balastro	68
5.5.	Resumo do capítulo.....	69
6.	Considerações finais.....	72
6.1.	Conclusões.....	72
6.2.	Desenvolvimentos Futuros	73
	Bibliografia.....	74
	ANEXO 1 – FICHEIRO (.k) DO MODELO DE REFERÊNCIA.....	79
	ANEXO 2 – EXCERTO DE APDL	83
	ANEXO 3 – EXCERTO DO FICHEIRO DE REESCRITURA DO FICHEIRO APDL PARA A FORMA DO LS-DYNA.....	86

Índice de figuras

Figura 1.1 - Quota modal do transporte ferroviário, entre 2000 e 2013 (European Court of Auditors, 2016).....	1
Figura 1.2 - Número de percursos a acidentes (adaptado de ERA (2018))	2
Figura 1.3 - Emissões CO ₂ da ferrovia comparadas com as estradas (European Court of Auditors, 2016)	2
Figura 1.4 - Elemento dividido em vários elementos finitos (adaptado de Azevedo, 2003)	4
Figura 2.1 - Troço de uma via-férrea balastrada (Silva, 2012)	7
Figura 2.2 - Perfil transversal da via-férrea balastrada (adaptado de Fortunato, 2005)	9
Figura 2.3 – Perfil de um carril (Silva, 2009)	9
Figura 2.4 – Perfis dos carris Vignoles, segundo a norma (EN 13674-1+A1, 2017)	10
Figura 2.5 - a) Exemplo de um sistema de fixação direta; b) exemplo de um sistema de fixação indireta (Rodrigues, 2017).....	11
Figura 2.6 - Sistema de fixação Vossloh W14 (Vossloh, 2015).....	11
Figura 2.7 – Palmilha associada ao sistema de fixação Vossloh (Vossloh, 2015)	12
Figura 2.8 – Travessas (Silva, 2010).....	12
Figura 2.9 - Travessas monobloco de betão pós-tensionadas utilizadas para os carris 54E1 e 60E1 (Rodrigues, 2017).....	13
Figura 2.10 – Balastro (Pires, 2018).....	13
Figura 2.11 - Representação das forças verticais presentes na via-férrea (adaptado de Selig e Waters, 1994)	16
Figura 2.12 - Representação das forças verticais, longitudinais e laterais aplicadas na via-férrea (adaptado de Selig & Waters, (1994)).....	17
Figura 2.13 - Fatores que contribuem para a contaminação do balastro calcário, em percentagem (adaptado de Selig e Waters, 1994).....	17
Figura 3.1 - Tipos de geossintéticos segundo a sua estrutura	22
Figura 3.2 - Diferentes tipos de geossintéticos: a) Geotêxtil; b) Georrede; c) Geomembrana; d) Geocompósito IGS - Portugal, (2017 a)	23
Figura 3.3 - a) Geogrelha Uniaxial; b) Geogrelha biaxial (Pinto, 2005)	24
Figura 3.4 - Geogrelha triaxial (adaptado de Pires, (2018)).....	24

Figura 3.5 - Representações das diferentes funções dos geossintéticos: a) função de drenagem; b) função de filtro; c) função de proteção; d) função de reforço; e) função de controlo da erosão superficial; f) função de barreira de fluidos (IGS - Portugal, (2017b))	26
Figura 3.6 - Função de estabilização (adaptado de EOTA TR041, 2012).....	26
Figura 3.7 - Aplicações dos geossintéticos numa via-férrea (IGS - Portugal, 2017c))	27
Figura 3.8 – Utilização de geogrelha na interface da camada de balastro e sub-balastro (adaptado de Das, 2016).....	28
Figura 3.9 - Utilização da geogrelha na interface da camada de sub-balastro com a fundação (adaptado de Das, 2016).....	28
Figura 3.10 – Confinamento (adaptado de Kawalec, 2017)	29
Figura 3.11 - Magnitude do efeito de confinamento (Pires, 2018).....	29
Figura 3.12 – Representação do mecanismo de imbricamento (Tensar, 2012).....	30
Figura 3.13 - Representação do efeito de membrana numa estrada não pavimentada (Tavares, 2009)	30
Figura 3.14 - a) Direção de ensaio para uma geogrelha uniaxial; b) direção de ensaio para uma geogrelha biaxial (Pires, 2018).....	33
Figura 3.15 - Direções de ensaio numa geogrelha triaxial (Pires, 2018).....	33
Figura 3.16 - Esquema do provete utilizado no ensaio à tração de uma geogrelha típica (ISO 10319, 2008)	34
Figura 3.17 - Curva típica carga-extensão (ISO 10319, 2008)	34
Figura 4.1 - Diferenças nos assentamentos totais, nos casos com e sem geogrelha, em termos de: c - coesão; Φ - ângulo de fricção; E - módulo de deformabilidade (adaptado de (Yap et al., 2017).....	41
Figura 5.1 - Corte do modelo tridimensional.....	45
Figura 5.2 - Comprimento do modelo	46
Figura 5.3 - Vista frontal do modelo com as dimensões transversais e espessuras das diferentes camadas modeladas (em metros).....	48
Figura 5.4 – a) Aspeto geral do Alfa-Pendular; b) Representação esquemática das duas primeiras carruagens do mesmo veículo (CP, 2018)	48
Figura 5.5 - <i>Bogie</i> do comboio Alfa-Pendular (CP, 2018).....	49
Figura 5.6 – Modelo do <i>bogie</i> utilizado no modelo tridimensional (dimensões em metros)	50
Figura 5.7 - Vista isométrica do modelo de referência, M01	50
Figura 5.8 - Vista isométrica do modelo M02	51
Figura 5.9 - Vista isométrica do modelo M03	51

Figura 5.10 - Vista isométrica do modelo 4 (M04).....	52
Figura 5.11 - Processo de criação do modelo tridimensional com recurso ao ANSYS (APDL) e LS-DYNA	54
Figura 5.12 - Vista isométrica do modelo com a malha de elementos finitos	55
Figura 5.13 - Esquema da suspensão primária.....	55
Figura 5.14 - Área de influência de cada nó (adaptado de (Rodrigues, 2017)).....	58
Figura 5.15 - Vista frontal do modelo com a indicação das condições de fronteira nos diferentes planos	60
Figura 5.16 - Esquema da aplicação de uma pressão uniforme sobre camadas restringidas.....	61
Figura 5.17 – Comparação do deslocamento do carril na 12ª travessa	63
Figura 5.18 - Ilustração do nó 99137 do modelo tridimensional	65
Figura 5.19 - Deslocamentos verticais do carril nos modelos M01 e M02	65
Figura 5.20 - Deslocamentos verticais do carril (M03 e M04)	66
Figura 5.21 - Deslocamentos horizontais do carril (M01 e M02)	67
Figura 5.22 - Deslocamento horizontal do carril (M03 e M04).....	67
Figura 5.23 - Ilustração do nó 62461 do modelo tridimensional	68
Figura 5.24 - Deslocamento horizontal do balastro (M01 e M02).....	68
Figura 5.25 - Deslocamento horizontal do balastro (M03 e M04).....	69

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Comparação de diversos fatores de uma via balastrada com uma via não balastrada (adaptado de Paixão (2009)).....	8
Tabela 3.1 - Tipos de geossintéticos associados às suas funções (adaptado de Koerner, (1998)).....	27
Tabela 3.2 - Requisitos das geogrelhas para o desempenho das funções de reforço e estabilização (adaptado de (Kawalec, 2017)	31
Tabela 5.1 - Tempos de computação em função do comprimento do modelo	46
Tabela 5.2 - Propriedades do carril com o perfil 60E1, segundo (EN 13674-1+A1, 2017).....	46
Tabela 5.3 - Propriedades do sistema de fixação modeladas (Vossloh, 2015).....	47
Tabela 5.4 - Propriedades das travessas modeladas, segundo (IMV-019, 2000).....	47
Tabela 5.5 - Propriedades das camadas da via-férrea modeladas	47
Tabela 5.6 - Características do veículo (CP, 2018).....	49
Tabela 5.7 - Valores do módulo de Young inicial e do troço degradado	50
Tabela 5.8 – Resumo da inclusão de degradação e da geogrelha nos diferentes modelos	52
Tabela 5.9 - Vantagens e desvantagens na utilização dos dois <i>softwares</i>	53
Tabela 5.10 - Dimensões dos elementos da malha de elementos finitos.....	54
Tabela 5.11 - Outras propriedades do veículo modeladas (FCT-UNL, IDMEC-IST, & REFER, 2008).56	
Tabela 5.12 - Coeficientes de rigidez e amortecimento para implementação de fronteiras viscoelásticas absorventes num modelo de elementos finitos, nas diferentes direções	59
Tabela 5.13 - Características da geogrelha fornecidas pelos fabricantes (ETA 12-0530, 2012).....	64
Tabela 5.14 - Características da geogrelha modeladas	64

Lista de abreviaturas utilizadas

EN – European Standards (Normas Europeias);

EOTA – European Organization for Technical Assessment (Organização Europeia de Aprovação Técnica);

ERA – European Union Agency for Railway (Agência Ferroviária Europeia);

EU – European Union (União Europeia);

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil;

IP – Infraestruturas de Portugal;

IGS – International Geosynthetics Society (Sociedade Internacional de Geossintéticos);

ISO – International Organization for Standardization (Organização Internacional de Normalização);

MEF – Método dos elementos finitos;

NP – Norma Portuguesa;

REFER – Rede Ferroviária Nacional;

VETOMAC – Vibration Engineering and Technology of Machinery (Engenharia de Vibrações e Tecnologias de Maquinaria).

Lista de símbolos utilizados

E – Módulo de Young;

ρ – Massa volúmica;

K_p – Coeficiente de rigidez da primeira suspensão;

C_p – Coeficiente de amortecimento da primeira suspensão;

D_{50} – Dimensão média do agregado/balastro;

M_u – Massa do oscilador;

ν – Coeficiente de Poisson;

α_r – Coeficiente de amortecimento de Rayleigh alfa;

β_r – Coeficiente de amortecimento de Rayleigh beta.

1. Introdução

1.1. Enquadramento do Tema

O transporte ferroviário é um dos meios de transporte de pessoas e mercadorias mais utilizados desde meados do século XIX. Contudo, a sua utilização perdeu alguma preponderância nos últimos tempos devido ao rápido crescimento dos meios de transporte rodoviários e aéreos. Segundo um relatório do *European Court of Auditors* (2016), que visitou 5 Estados-Membros da União Europeia (EU), a quota modal de mercadorias transportadas por via-férrea diminuiu entre 2000 e 2013, em quatro dos cinco países analisados (figura 1.1).

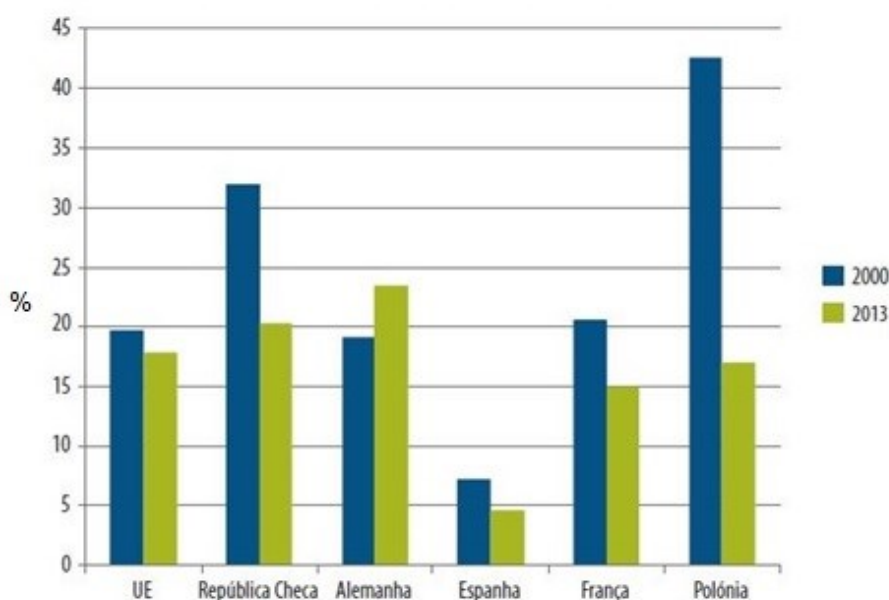


Figura 1.1 - Quota modal do transporte ferroviário, entre 2000 e 2013 (European Court of Auditors, 2016)

Estes são exemplos de alguns dos fatores que levam a um aumento da pressão sobre a indústria ferroviária para que melhore a sua eficiência. É exigido à indústria ferroviária que os comboios que circulam nas nossas ferrovias sejam cada vez mais pesados e mais rápidos, o que provoca uma crescente deterioração das mesmas em função de cargas cíclicas também cada vez maiores e que geram alterações no comportamento destas. Segundo a Agência Ferroviária da União Europeia (ERA), as deformações na via-férrea e a presença de carris danificados, são os principais fatores percussores de acidentes (figura 1.2). Aliado a estes fatores, algumas das ferrovias existentes estão envelhecidas e foram dimensionadas para situações diferentes das quais são utilizadas hoje em dia, sendo por isso necessária a sua reparação ou substituição.

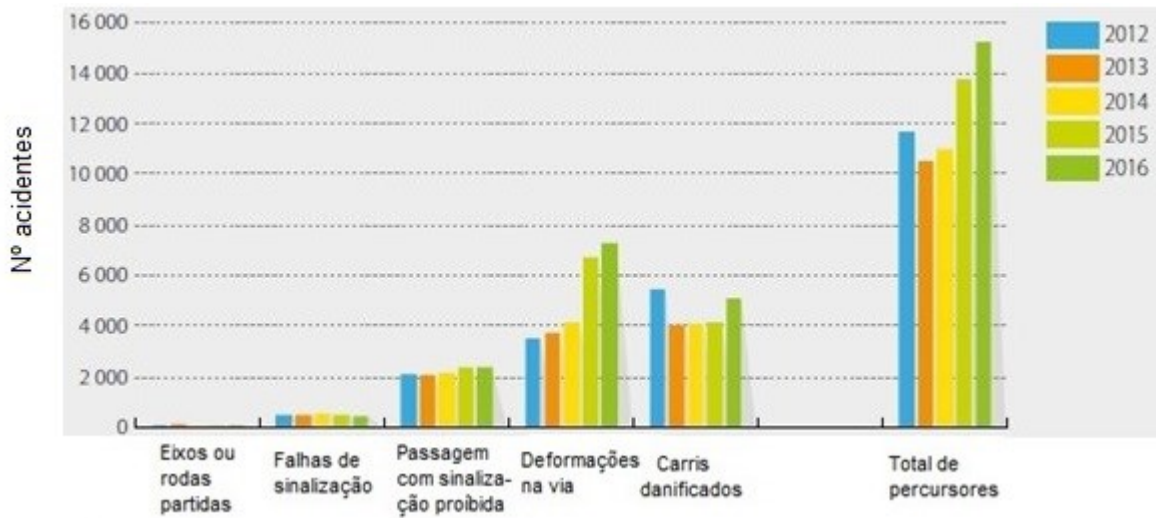


Figura 1.2 - Número de percursos a acidentes (adaptado de ERA (2018))

Se tivermos também em conta que existem diretivas europeias que vão no sentido da diminuição das emissões de CO₂ – é objetivo da União Europeia reduzir estas emissões em 60% até 2050, relativamente aos níveis de 1990 - e tendo em conta que o transporte rodoviário têm maiores emissões deste gás do que o transporte ferroviário (figura 1.3), encontramos aqui vários motivos para nos debruçarmos sobre soluções que aumentem a eficiência das linhas férreas e que diminuam ao mesmo tempo os custos associados à sua construção e manutenção (European Court of Auditors, 2016).

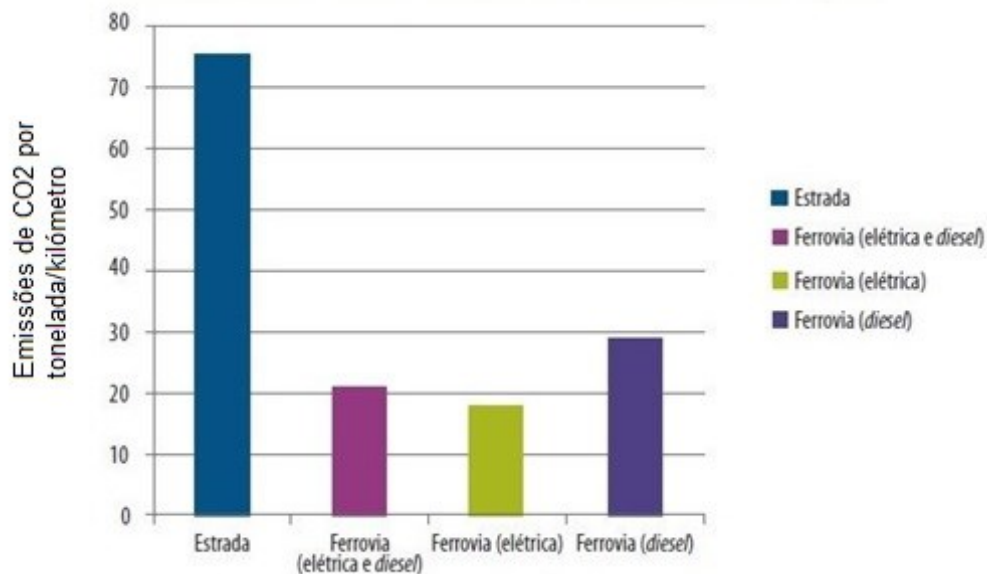


Figura 1.3 - Emissões CO₂ da ferrovia comparadas com as estradas (European Court of Auditors, 2016)

É neste contexto que surge a aplicação dos geossintéticos em vias-férreas. São materiais que são usados em engenharia desde meados dos anos 70 e que podem ter diversas funções num projeto ferroviário, como por exemplo:

- Estabilização de taludes;
- Separação de materiais com diferentes granulometrias;
- Drenagem;
- Filtragem;
- Reforço e estabilização da camada de balastro

Relativamente a este último ponto destacam-se as geogrelhas, material da família dos geossintéticos, e que têm desempenhado um importante papel no reforço e estabilização das camadas granulares da via-férrea.

A influência da inclusão de geogrelhas no reforço e estabilização de vias-férreas foi alvo de diversos estudos numéricos, maioritariamente através do método dos elementos finitos (MEF) e do método dos elementos discretos. Estes trabalhos focaram-se sobretudo em estudar assentamentos da via-férrea, a influência que os diferentes tipos de geogrelha (biaxiais ou triaxiais) conferem ao desempenho da via, a posição ideal para a colocação da geogrelha, a influência de balastro contaminado na interação balastro-geogrelha e conseqüentemente no comportamento da via. Mas os modelos numéricos realizados nestes estudos apenas representam, na sua maioria, os ensaios de laboratório realizados em simultâneo pelos autores, estando assim ainda em aberto o estudo do comportamento de uma via-férrea degradada e reforçada com geogrelhas.

Assim, o estudo dos efeitos da passagem de um veículo num troço de via-férrea degradada e reforçada com geogrelhas permanece ainda em aberto, pelo que será estudado nesta dissertação através da utilização de um modelo numérico de elementos finitos.

1.2. Método dos elementos finitos e *software*

Em engenharia, o MEF é bastante utilizado na resolução de problemas práticos desde que o computador digital passou a ser comumente utilizado. A essência de uma solução em MEF para um determinado problema de engenharia é o de estabelecer e resolver um sistema/conjunto de equações algébricas, e foi apenas a partir do uso frequente de computadores digitais que este método conseguiu ser efetivo e aplicado às mais diversas situações. Na análise de estruturas o objetivo do MEF é o de determinar o estado de tensão e deformação de um sólido de geometria arbitrária quando sujeito a ações exteriores (Azevedo, 2003).

A solução analítica deste tipo de problemas requer normalmente que se resolvam problemas de valores de fronteira, cujas equações governadoras são equações diferenciais parciais (acompanhadas das

condições de fronteira), o que na maioria dos casos é muito difícil. No entanto, a formulação em MEF permite transformar este sistema de equações diferenciais em equações integrais, utilizando métodos variacionais e, conseqüentemente, usando um conjunto de funções de forma simples, num sistema de equações algébricas. O conjunto de funções de forma está associado à subdivisão do domínio original em partes mais pequenas e com uma forma mais simples, chamadas de elementos finitos (figura 1.4) e, serve para aproximação do campo da incógnita fundamental do problema, como por exemplo, do campo de deslocamentos. Para a resolução destas incógnitas, ou seja, para a determinação dos valores dos deslocamentos nos nós dos elementos finitos, as equações governadoras reescrevem-se na forma integral para cada elemento finito e em seguida agrupam-se num sistema de equações globais algébricas que definem todo o problema. Neste caso o campo de deslocamentos corresponde a uma aproximação muito aceitável, no entanto, as tensões derivadas posteriormente já envolvem mais aproximações devido à necessidade de introduzir médias ponderadas para assegurar a continuidade dos valores nos nós.

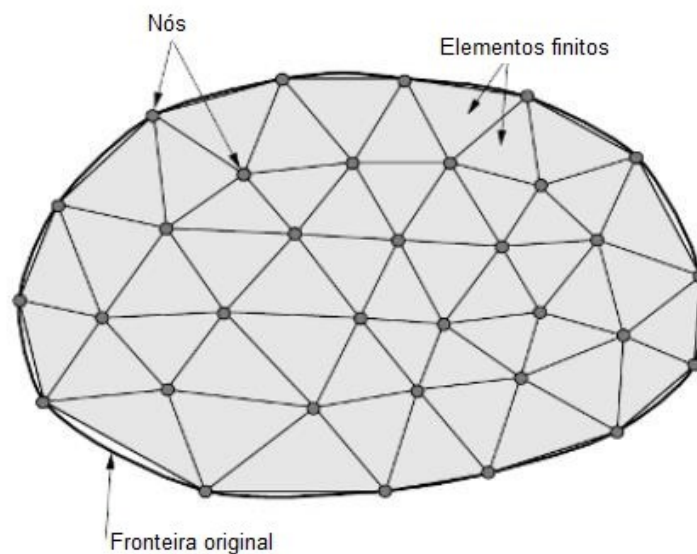


Figura 1.4 - Elemento dividido em vários elementos finitos (adaptado de Azevedo, 2003)

A divisão de um domínio em partes mais simples tem diversas vantagens como a representação precisa de uma geometria complexa, a fácil representação da solução final e a compreensão dos efeitos locais. A escolha da geometria dos elementos do subdomínio e também do número de subdomínios a utilizar depende da geometria do domínio, das propriedades do domínio (como por exemplo, das propriedades mecânicas), do tipo de análise a executar e do tipo de carregamento a que o domínio está sujeito. À definição do conjunto dos subdomínios chamamos de discretização da malha.

Devido à divisão do domínio em subdomínios e, à aproximação do campo da incógnita fundamental do problema pelas funções polinomiais, em que as derivadas são facilmente determinadas, o comportamento de cada elemento é representado por equações simples que aproximam localmente as

equações complexas do domínio original, já que estas equações são geralmente equações diferenciais parciais, que são difíceis de resolver. Este processo elimina as derivadas espaciais das equações diferenciais parciais, gerando um conjunto de equações algébricas para as análises estáticas e, um conjunto de equações diferenciais ordinárias para análises dinâmicas. As análises dinâmicas são depois resolvidas através de métodos explícitos ou implícitos de integração numérica.

1.3. LS-DYNA

Para a realização desta dissertação, foram utilizadas as ferramentas de análise e pós-processamento do LS-DYNA, um *software* de elementos finitos que tem como objetivo analisar a resposta estática e, principalmente, a resposta dinâmica das estruturas. A principal metodologia para esta solução é baseada num método de integração explícita do tempo.

Este *software* foi criado em 1976 no *Lawrence Livermore National Laboratory*, e era designado por DYNA3D. As suas primeiras aplicações iam no sentido da análise de tensões de estruturas sujeitas a diversas cargas de impacto. Ao longo dos anos várias atualizações do *software* introduziram novas características neste, até que no final de 1988 foi criada a empresa *Livermore Software Technology Corporation* para o desenvolver, mudando ao mesmo tempo o nome do *software* para o que conhecemos hoje em dia (Hallquist, 2006).

1.4. Objetivos

Os objetivos definidos para esta dissertação incluem:

1. Estudar a influência da inclusão da geogrelha no comportamento de uma via-férrea que está parcialmente degradada ao nível da camada de balastro, em termos de:
 - a. Deslocamentos verticais dos carris;
 - b. Deslocamentos horizontais dos carris;
 - c. Deslocamentos horizontais da camada de balastro.

1.5. Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos:

O presente capítulo pretende fazer um enquadramento ao tema, explicando a motivação para a realização deste trabalho e as soluções para a resolução do problema. Faz-se ainda uma breve introdução ao MEF e ao LS-DYNA, e explicitam-se os objetivos para a dissertação.

O segundo capítulo aborda os diferentes tipos de vias-férreas e as suas vantagens e desvantagens. Posteriormente é analisado em maior detalhe a via-férrea balastrada e os elementos que a constituem, bem como os fatores que levam à sua degradação.

No terceiro capítulo faz-se uma introdução aos geossintéticos, ao seu desenvolvimento e diferentes tipos e funções. São depois detalhadas as propriedades ligadas às geogrelhas e as suas aplicações em vias-férreas e também os seus mecanismos de funcionamento.

No capítulo 4 apresenta-se a síntese do estado do conhecimento relativo à utilização de modelos numéricos para representar a aplicação de geogrelhas em vias-férreas.

O caso de estudo e todas as especificidades relativas à sua conceção são detalhadas no capítulo 5. Neste capítulo são também apresentados e analisados os resultados obtidos com o modelo numérico.

Para o capítulo 6 estão reservadas as conclusões e as recomendações para futuros desenvolvimentos.

O anexo I contém parte do ficheiro (.k) correspondente ao modelo de referência.

No anexo II é apresentado uma parte do ficheiro utilizado para a criação do modelo com recurso à APDL.

No anexo III são apresentados os comandos utilizados para reescrever o código na forma de comandos do LS-DYNA.

1.6. Publicações relacionadas

Da realização da presente dissertação e no âmbito da 14^a Conferência Internacional em Engenharia de Vibrações e Tecnologias de Maquinaria (VETOMAC XIV), resultou a publicação de um artigo com o título “Numerical analysis of geogrid contribution to railway track reinforcement” (Lança, et al., 2018).

2. Via-férrea

2.1. Introdução

Neste capítulo abordam-se os diferentes tipos de via-férrea existentes, quais os mais utilizados e porquê, como funciona a via-férrea balastrada, que materiais a constituem e quais as suas funções, assim como as ações aplicadas na via pela passagem de material circulante e quais as consequências inerentes à passagem destes materiais.

2.2. Via-férrea balastrada

A via ferroviária ou via-férrea é a estrutura sobre a qual circulam comboios e veículos relacionados sendo que, o desígnio de uma via ferroviária funcional e moderna é o de proporcionar aos seus utentes um meio de transporte económico, confortável e relativamente rápido. Este tipo de via, ilustrada na figura 2.1, suporta o peso dos veículos que nela circulam ao mesmo tempo que os guiam através do seu percurso e, para tal esta é constituída por uma plataforma que engloba alinhamentos vertical e horizontalmente restringidos, ao contrário de outros tipos de via que servem simplesmente como superfícies por onde circulam livremente distintos tipos de veículos (Fortunato, 2005).

Hoje em dia o tipo de via-férrea mais utilizada é a via balastrada, devido a fatores como a maior rapidez na sua construção (associada a custos mais reduzidos), flexibilidade na redefinição do traçado e uma maior facilidade na correção da geometria da via e na sua manutenção (Barreto, 2016).

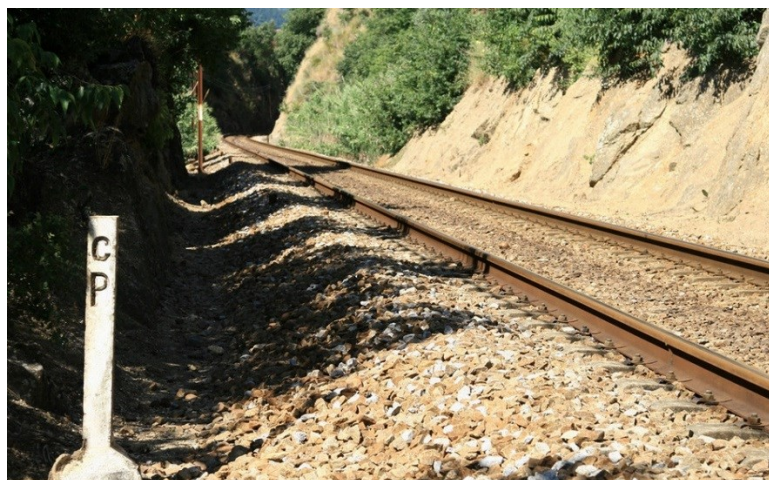


Figura 2.1 - Troço de uma via-férrea balastrada (Silva, 2012)

Existem outros tipos de vias-férras que são utilizadas em contextos onde as vias balastradas não são as mais indicadas. Por exemplo, em pontes e túneis, onde a manutenção do balastro é bastante difícil, são utilizadas lajes contínuas de betão armado, onde assentam os carris. A estas vias dá-se o nome de via-férrea não balastrada ou via em laje. Contudo, e apesar de ser necessário um maior investimento

e de a sua manutenção ser mais difícil, apresenta um nível de degradação muito menor ao longo do tempo, quando comparada com a via balastrada, para além de fornecer uma maior estabilidade à via, o que permite que os veículos que nela circulam o façam a uma maior velocidade (Tutumluer e Al-Qadi, 2009).

Na tabela 2.1 apresenta-se uma comparação de vantagens e desvantagens destes tipos de via:

Tabela 2.1 - Comparação de diversos fatores de uma via balastrada com uma via não balastrada (adaptado de Paixão (2009))

Fatores	Via balastrada	Via não balastrada
Custos de construção	Custo de instalação inferior aos da via em laje	Custos de instalação significativos se não forem implementados processos de construção mecanizados
Período de vida útil	Necessária renovação de via, no máximo após 30 anos, dependendo do tráfego	Valor estimado de 60 anos
Secção da superestrutura	Maior espessura da secção transversal assim como maior ocupação em planta	Permite uma menor secção em túneis e menor carga permanente em pontes
Custos de conservação, renovação e reabilitação	Trabalhos frequentes e dispendiosos e, necessidade de renovação intercalar de alguns elementos com menor período de vida útil	Drástica redução de trabalhos de conservação; em algumas tipologias, os trabalhos de renovação ou reabilitação são mais complexos
Traçado	Possibilidade de correções na geometria da via com operações de ataque	Permite menores raios, possibilitando uma melhor adaptação ao terreno natural
Rigidez de via	Reduzida uniformidade da rigidez vertical da via, mas contributo positivo das propriedades mecânicas do balastro	Elevado controlo da rigidez de via; necessidade de disposições específicas em zonas de transição
Estabilidade de via	Estabilidade transversal limitada devido às propriedades mecânicas do balastro	Elevada resistência e durabilidade, contribuindo para a conservação da qualidade geométrica da via
Projeção de balastro	Fenómeno verificado para velocidades elevadas	Inexistente
Ruído	Boa absorção acústica	Necessidade de disposições adicionais para atingir o mesmo nível de emissões

Este tipo de via é constituído por duas partes distintas: a superestrutura e a subestrutura. A superestrutura engloba os carris, sistemas de fixação, palmilhas, travessas e o balastro enquanto a subestrutura é constituída pelo sub-balastro e solo adjacente, como se pode observar na figura 2.2. Todos estes componentes serão descritos com maior detalhe nos próximos subcapítulos.

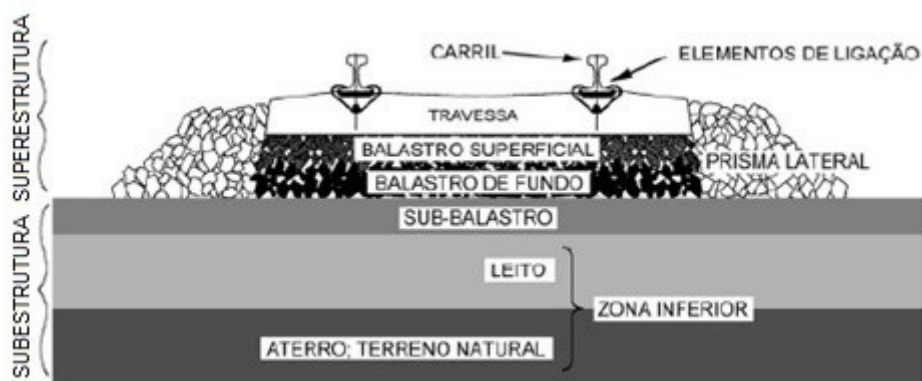


Figura 2.2 - Perfil transversal da via-férrea balastrada (adaptado de Fortunato, 2005)

2.3. Superestrutura

2.3.1. Carris

Os carris são os componentes da via-férrea que estão em contacto com o veículo e por isso os primeiros a ser solicitados, sendo o seu principal objetivo o de guiar (figura 2.3). Têm também de possuir uma rigidez que permita transmitir as cargas aplicadas pelo veículo para as travessas ao mesmo tempo que fornecem uma superfície suave para que este circule sem perturbações.



Figura 2.3 – Perfil de um carril (Silva, 2009)

A Norma Europeia EN 13674-1+A1, 2017 especifica 23 tipos de carris de perfil Vignoles, que são os mais utilizados em linhas principais na Europa. Na figura 2.4 estão ilustrados dois destes perfis (54E1

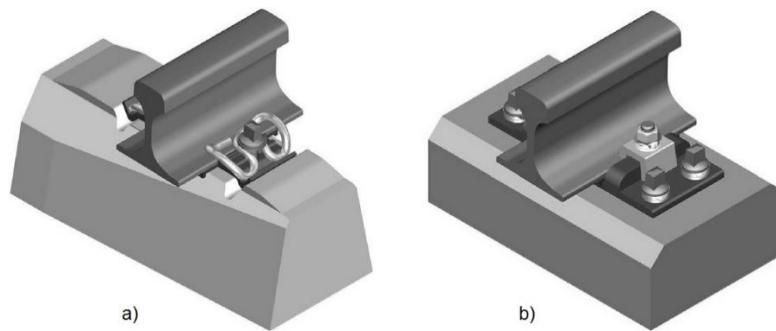


Figura 2.5 - a) Exemplo de um sistema de fixação direta; b) exemplo de um sistema de fixação indireta (Rodrigues, 2017)

Na figura 2.6 está representado o sistema de fixação direta Vossloh W14 (cujas características serão utilizadas mais à frente neste trabalho), onde podemos dar conta de todos os componentes que fazem parte deste sistema de fixação.

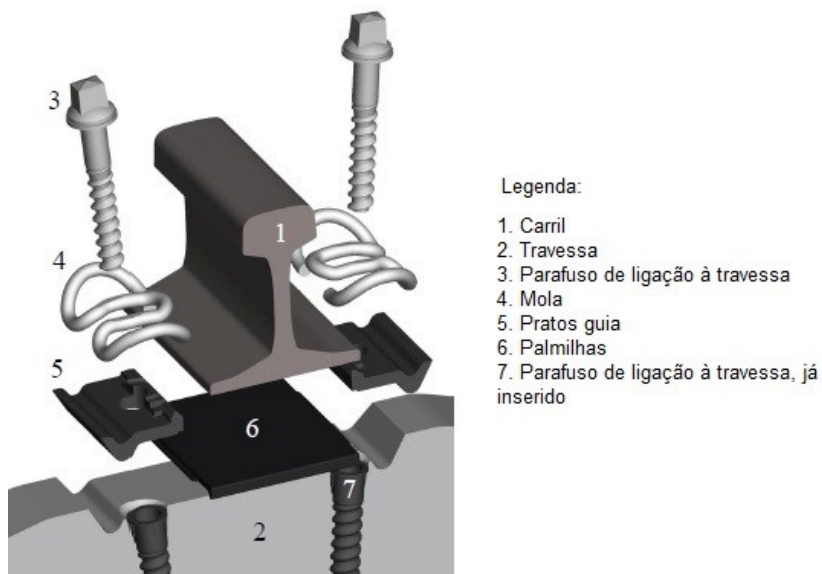


Figura 2.6 - Sistema de fixação Vossloh W14 (Vossloh, 2015)

2.3.3. Palmilhas

As palmilhas, apesar de usualmente terem apenas 10 mm de espessura (ou menos) são elementos com bastante preponderância para o correto funcionamento da via, já que são o elemento onde os carris assentam, fazendo com que sejam responsáveis pelo amortecimento das vibrações do sistema roda-carril, reduzir o atrito entre os carris e as travessas e servir de isolamento elétrico para os circuitos da via. São produzidas a partir de diversos materiais, sendo os polímeros e materiais compósitos os

mais usuais (Esveld, 2001). Na figura 2.7 está ilustrada a palmilha que se utiliza, em conjunto com o sistema de fixação descrito em 2.3.2.



Figura 2.7 – Palmilha associada ao sistema de fixação Vossloh (Vossloh, 2015)

2.3.4. Travessas

As travessas (figura 2.8) são suportes - normalmente de betão armado ou de madeira - colocados perpendicularmente aos carris, que se apoiam sobre estas e são fixados pelos sistemas de fixação. A principal função desta componente da via-férrea é receber as cargas horizontais e verticais provenientes dos carris e distribuí-las pelo balastro da maneira mais uniforme possível, ao mesmo tempo que assegura a bitola e a inclinação dos carris (Luís, 2013).



Figura 2.8 – Travessas (Silva, 2010)

Em Portugal, a Infraestruturas de Portugal (IP) utilizam as travessas em monobloco de betão (figura 2.9), tanto para os carris com o perfil 54E1, como para os de perfil 60E1. Estas travessas são, como o próprio nome indica constituídas por um único bloco de betão, podendo ser de dois tipos: pré-tensionadas quando os esforços são aplicados durante a betonagem; pós-tensionadas quando os esforços são aplicados depois da betonagem. O documento da REFER/IP (IMV-019, 2000) especifica que as travessas devem estar espaçadas entre si 0,60 m.

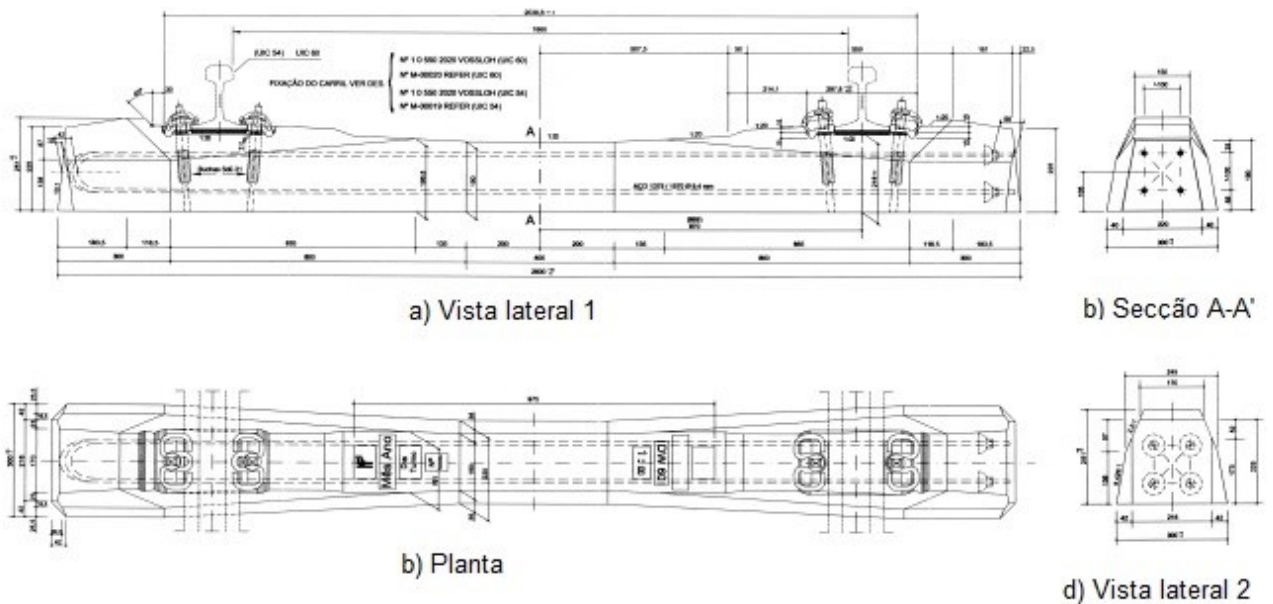


Figura 2.9 - Travessas monobloco de betão pós-tensionadas utilizadas para os carris 54E1 e 60E1 (Rodrigues, 2017)

2.3.5. Balastro

O balastro (figura 2.10), segundo a IP, (2016), é “o leito de brita subjacente à linha e que assenta diretamente na plataforma. Material de granulometria seleccionada destinado a suportar e encastrar as travessas, a distribuir cargas transmitidas pelas travessas à plataforma, a conferir elasticidade à via e a facilitar a drenagem.”



Figura 2.10 – Balastro (Pires, 2018)

Assim, a camada de balastro absorve as cargas transmitidas pelas travessas, encaminhando-as para as camadas adjacentes, fazendo-o de uma maneira que minimiza a degradação da linha e das camadas de solo. Isto acontece devido a forças internas de fricção entre as partículas de balastro, que

fazem com que este tenha a capacidade de absorver forças de compressão significativas e algumas forças de corte, mas não absorve forças de tração.

Idealmente, as partículas de balastro devem ser de forma poliédrica, faces rugosas e arestas vivas, boa resistência química e estar livres de poeiras e pó. Por isso, este material tem de ser obtido exclusivamente de rochas duras e sãs, ou seja, que revelem elevada resistência à fragmentação e ao desgaste. Em Portugal, a IP recomenda rochas como o granito, gabro ou o basalto como boas fontes de balastro.

As funções para as quais as camadas de balastro são dimensionadas incluem: a) servir de apoio às travessas; b) resistir a esforços verticais, laterais e longitudinais a fim de manter a linha no alinhamento correto; c) promover o amortecimento das ações dinâmicas através da absorção das vibrações; d) permitir o escoamento de material poluente proveniente do material circulante; e) permitir operações de manutenção da via; f) permitir o escoamento das águas pluviais que caem na via; g) evitar o aparecimento de vegetação na via; minimizar os efeitos das ações climáticas no funcionamento da via; h) reduzir as cargas transmitidas pelas travessas da forma mais uniforme possível. São, por isso, bastante diversificadas as características que procuramos nos constituintes da via para que consigam desempenhar as suas funções corretamente, sendo que algumas delas são contraditórias, o que faz com que não haja um balastro indicado para todos os casos. Deve portanto ser procurado um equilíbrio entre a capacidade de carga e a capacidade drenante do balastro (Esveld, 2001).

As características técnicas necessárias para a aceitação do balastro segundo a norma europeia NP EN 13450, (2005) são a resistência mecânica (à fragmentação e ao desgaste), a dimensão dos agregados, a granulometria, o conteúdo de partículas finas (menores que 0,5 mm), o conteúdo de finos (menores que 0,063 mm), a forma e a percentagem de materiais indesejáveis.

Uma camada de balastro deve conter partículas de dimensões na ordem dos 28 aos 50 mm e a sua espessura considerada como ótima encontra-se entre os 250 e os 300 mm, devendo ser constante ao longo de toda a linha, para que haja uma maior facilidade nos trabalhos de manutenção da via (Fortunato, 2005).

2.4. Subestrutura

2.4.1. Sub-balastro

O sub-balastro é a camada que se situa entre a camada de balastro e o solo de fundação. Esta camada é dimensionada com o objetivo de proteger a plataforma da via e distribuir as tensões provenientes da camada de balastro sem que seja necessário aumentar a sua espessura. Quando os trabalhos são efetuados sob solos altamente plásticos, o sub-balastro pode atuar também como camada de proteção,

não permitindo que as partículas do solo ascendam para o balastro e o contaminem, situação que levaria a uma diminuição das suas capacidades (Esveld, 2001).

Assim, exige-se geralmente à camada de sub-balastro que tenha um módulo de deformabilidade elevado e um coeficiente de permeabilidade entre os níveis do balastro e da fundação, para que a água proveniente da fundação não contamine o balastro, ao mesmo tempo que facilita a drenagem das águas provenientes desta mesma camada superior (Esveld, 2001).

Como forma de cumprir este propósito, o material que compõe esta camada deve ser idêntico ao do balastro mas com exigências de desgaste diferentes. O seu diâmetro deve andar na ordem dos 5 aos 40 mm e a espessura da cama deve ser no mínimo 100 mm (IT.GEO.006, 2007).

2.4.2. Fundação

A camada de fundação fornece uma plataforma para construção da via. Em geral, a fundação deve ter rigidez suficiente para permitir suportar tanto o peso dos componentes da via como os esforços induzidos pela passagem dos veículos, ao mesmo tempo que tem uma baixa compacidade para minimizar os assentamentos provocados por estas mesmas cargas (Esveld, 2001).

2.5. Fatores de degradação da via-férrea

2.5.1. Forças aplicadas na via

Entender o tipo e a magnitude das forças aplicadas na via-férrea é essencial para um bom dimensionamento da estrutura. As forças aplicadas na via são classificadas de mecânicas (estáticas e dinâmicas), e térmicas, sendo que no âmbito deste trabalho serão apenas abordadas as forças mecânicas. A estrutura das vias-férreas balastradas deve estar preparada para restringir repetidamente forças verticais, laterais e longitudinais resultantes do tráfico e das mudanças de temperatura (Kwan, 2006).

As interações dinâmicas entre as rodas dos veículos e os carris são função da via, do veículo e das suas características, das condições em que este opera e das condições ambientais. As forças aplicadas à via pelo material circulante são uma combinação de cargas estáticas e cargas dinâmicas sobrepostas às estáticas. A carga estática não é nada mais que o peso combinado da superestrutura e da subestrutura mais o peso do veículo, enquanto as cargas dinâmicas são função da velocidade de circulação dos veículos. Os esforços e tensões máximas na via ocorrem devido ao efeito destas cargas dinâmicas. A diferença entre a carga estática e a carga dinâmica é dado o nome de incremento dinâmico. Altas frequências provocam igualmente cargas dinâmicas, sendo que as vibrações também podem afetar significativamente o desempenho da via, particularmente a altas velocidades (Kwan, 2006).

As duas ações que maioritariamente geram forças aplicadas na via são a circulação dos veículos e também os trabalhos de manutenção, sendo que a estas ações correspondem forças verticais. Consideram-se forças verticais aquelas que são perpendiculares ao plano dos carris, havendo dois tipos destas forças: a força vertical das rodas e a força de elevação. A força vertical da roda atua no sentido descendente, o que faz com que os pontos em redor do ponto de contacto entre a roda e o carril, estes tenham tendência para se elevar como podemos ver na figura 2.11, causando a referida força de elevação. Se o peso combinado do carril e da travessa e as forças de fricção do balastro não forem suficientes para contrariar esta força de elevação, a travessa eleva-se momentaneamente. À medida que a roda vai avançando força a travessa a voltar à sua posição original. Este movimento cria um impacto muito grande na estrutura da via, e em particular nas partículas de balastro, o que pode levar à deterioração da via e dos seus componentes (Selig & Waters, 1994).

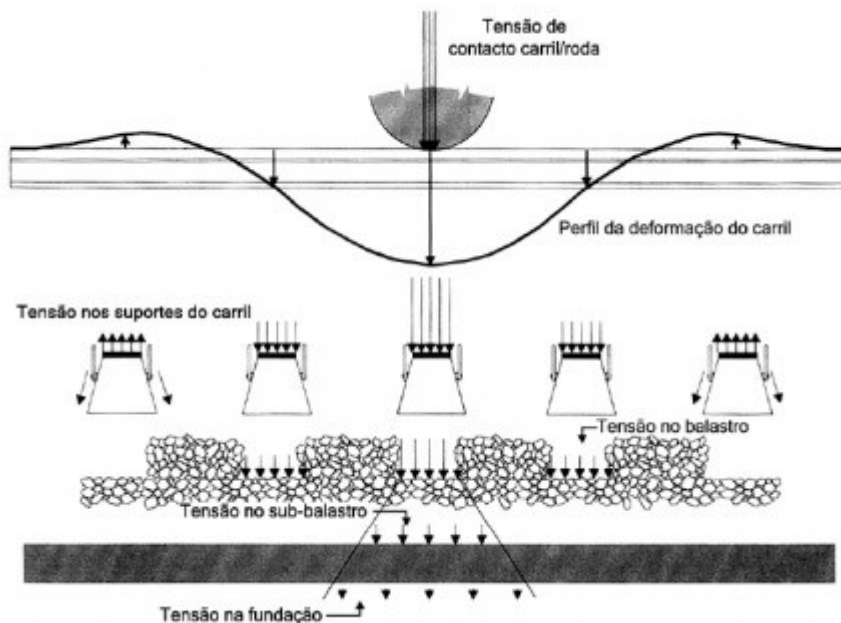


Figura 2.11 - Representação das forças verticais presentes na via-férrea (adaptado de Selig e Waters, 1994)

As forças laterais aplicadas na via são perpendiculares ao eixo do carril e contidas no plano de rolamento, podendo ser causadas por forças laterais induzidas pelos rodados – que resulta da fricção entre os rodados e o carril - e por forças induzidas pelas variações de temperatura.

As forças longitudinais, paralelas ao eixo do carril, podem surgir devido aos movimentos de aceleração e travagem dos rodados e a variações de temperatura.

Na figura 2.12 podemos observar uma representação das forças aplicadas na via-férrea.

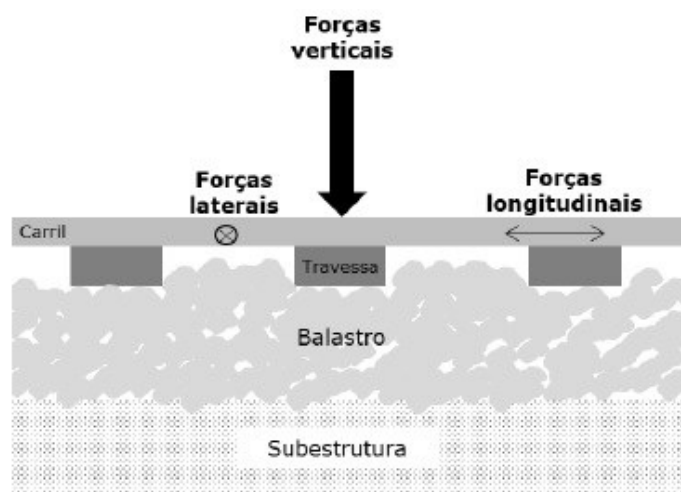


Figura 2.12 - Representação das forças verticais, longitudinais e laterais aplicadas na via-férrea (adaptado de Selig & Waters, (1994))

2.5.2. Degradação da camada de balastro

O desempenho de uma via-férrea balastrada é muito dependente da camada de balastro. A experiência da indústria ferroviária diz-nos que em vias balastradas, apoiadas sobre fundações com a adequada capacidade para suportar a via, e depois da estabilização das camadas de suporte, é o balastro que contribui de forma mais significativa para a degradação da via (Kwan, 2006).

Existem, segundo (Selig e Waters, 1994), cinco fatores que contribuem para a contaminação da camada de um balastro calcário: 1) a desagregação das partículas de balastro; 2) infiltrações no balastro através da superfície; 3) desgaste nas travessas; 4) infiltrações através das camadas adjacentes; 5) e infiltrações através da camada de fundação. Conforme podemos ver na figura 2.13, considera-se a desagregação das partículas de balastro o principal fator de degradação da camada de balastro.

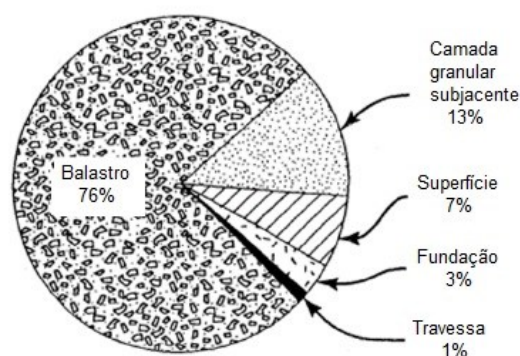


Figura 2.13 - Fatores que contribuem para a contaminação do balastro calcário, em percentagem (adaptado de Selig e Waters, 1994)

Segundo (Fontul, 2016), esta degradação ocorre devido a diversos fatores, como por exemplo:

- Tráfego – o avançar dos rodados provoca deslocamentos verticais das travessas, que conseqüentemente causam impactos no balastro. Existe uma sobrecarga na camada de balastro, que pode levar à sua rotura, deslizamento, esmagamento e fragmentação;
- Trabalhos de conservação – trabalhos como o ataque mecânico pesado ou o desguarnecimento provocam desgaste das partículas de balastro;
- Contaminação com finos (de baixo para cima) – quando não existem camadas protetoras abaixo do balastro ou essas não se encontram nas melhores condições;
- Contaminação com finos (de cima para baixo) – ocorre devido a alterações climáticas (chuva, neve, etc.) ou devido ao derrame de material transportado pelos veículos que circulam na via.

2.5.3. Assentamentos e deterioração da via

A via-férrea sofre assentamentos devido à deformação permanente do balastro e da camada de fundação. Estes assentamentos dão-se maioritariamente devido a cargas cíclicas provenientes da circulação de veículos, sendo que a gravidade destes assentamentos é ditada pela qualidade do balastro, do sub-balastro, da camada de fundação, bem como pelo correto dimensionamento da via.

Segundo Dahlberg, (2004) os assentamentos da via ocorrem em duas fases distintas: 1) imediatamente a seguir à colocação do balastro, onde os assentamentos se dão rapidamente até à consolidação; 2) assentamentos temporais com uma relação linear.

Na segunda fase dos assentamentos dão-se vários mecanismos ao nível do balastro e da camada de fundação: densificação volumétrica causada pela contínua passagem de veículos; material de balastro que se infiltra na camada de sub-balastro e na fundação; desagregação do balastro devido às cargas impostas pelos veículos e às condições ambientais, que causam uma redução volumétrica devido à diminuição do índice de vazios que leva a uma melhor compactação; uma redução do volume devido ao desgaste das partículas; recuperação inelástica devido a um micro deslizamento entre as partículas de balastro causado pelas cargas aplicadas; o movimento lateral do balastro e/ou das partículas da camada de fundação levam a que as travessas se afundem na camada de balastro; movimentos laterais e longitudinais das travessas vão empurrando o balastro, fazendo com que as próprias travessas se afundem na camada de balastro (Dahlberg, 2004).

Ao nível da deterioração da via-férrea, a deterioração vertical é normalmente causada por assentamentos diferenciais da camada de balastro e da camada de fundação. Estes assentamentos podem ser causados por (Kwan, 2006): a) forças dinâmicas e irregularidades nas rodas; b) formato dos carris – defeitos ou irregularidades longitudinais; c) espaçamento das travessas; d) suportes das travessas; e) assentamentos da camada de balastro; f) subestrutura.

2.6. Resumo do capítulo

Neste capítulo foi feita uma introdução à via-férrea balastrada e enumeradas algumas das suas vantagens quando comparada com outros tipos de vias. Algumas vantagens deste tipo de via quando comparada com outros existentes, são a rapidez na sua construção, a flexibilidade na redefinição do seu traçado caso esta seja necessária e a sua fácil manutenção

Foi, também, feita uma descrição dos materiais que constituem este tipo de via, das suas características e da função de cada um no comportamento geral da mesma.

Por último foram descritos os fatores que contribuem para a degradação da via-férrea. Verificou-se que a desagregação das partículas de balastro é apontada, pela maioria dos autores, como a principal causa para a degradação da camada de balastro. Verificou-se igualmente que os assentamentos da camada de balastro se dão em duas fases distintas: numa primeira fase imediatamente a seguir à colocação do balastro, e numa segunda, onde os assentamentos se dão com uma relação temporal linear. São estes assentamentos diferenciais, tanto da camada de balastro como da fundação, a maior causa de deterioração da via-férrea balastrada.

3. Geossintéticos

3.1. Introdução

Neste capítulo irão ser apresentados os geossintéticos. Segundo a norma ISO 10318-1: 2005, um geossintético é definido como um produto plano produzido através de materiais polímeros, e que é utilizado em contacto com solo, rocha ou com qualquer outro material geotécnico como parte integral de um projeto, estrutura ou sistema.

Apresenta-se, também, uma síntese de como estes materiais se desenvolveram ao longo do tempo. São ainda descritos os diferentes tipos de geossintéticos, as suas propriedades e funções, com especial incidência nas geogrelhas triaxiais, que serão utilizadas no caso de estudo apresentado no capítulo 5.

3.2. Desenvolvimento dos geossintéticos

As primeiras tentativas de reforçar solos surgiram há muito tempo atrás; a adição de materiais que contribuísse para melhorar o comportamento dos solos foram feitos muito antes de haver registos sobre este processo. Podemos admitir que as primeiras tentativas foram as de estabilizar pântanos e solos pantanosos utilizando troncos de árvores e pequenos arbustos. Estes solos moles aceitavam estes materiais fibrosos até uma espécie de massa que tinha as características desejadas para o efeito estar formada.

A primeira utilização de têxteis no reforço de estruturas rodoviárias deu-se em 1926, pelo Departamento de Autoestradas da Carolina do Sul. Um produto têxtil de algodão foi colocado entre uma camada de solo e a camada de asfalto. Até o algodão começar a apresentar sinais de degradação, vários estudos feitos na rodovia provaram que o têxtil reduziu as fendas e falhas localizadas (Koerner, 1998).

Para que a utilização de soluções de reforço do solo fosse viável a longo prazo, era necessário arranjar matérias-primas que não se degradassem ao longo do tempo. O aparecimento dos polímeros sintéticos na década de 40, foi a alavanca para o desenvolvimento dos geossintéticos como os conhecemos hoje; na década de 50, surgiram os geotêxteis tecidos e na década de 60 os geotêxteis não-tecidos.

Na década de 70, o desenvolvimento de geotêxteis não-tecidos agulhados espoletou um grande aumento da utilização de geotêxteis na indústria da construção, devido não só ao seu baixo custo e fácil aplicação em obra, mas também à sua diversidade de funções. Graças ao sucesso na aplicação de geotêxteis, começaram a surgir, na década de 80, uma vasta gama de produtos com estruturas distintas, de que falaremos no subcapítulo seguinte (LNEC, 2007).

É também desde o início dos anos 70 que os geossintéticos têm sido utilizados com êxito na construção e reabilitação de vias-férreas. Devido às suas características técnicas, diminuem os danos causados na via, contribuindo para:

- O aumento do conforto e uma redução do risco de acidente;
- Uma diminuição dos custos de manutenção e dos trabalhos de reparação.

Koerner, (1998), aponta algumas das razões para o grande interesse e rápido desenvolvimento dos geossintéticos, que incluem:

- Serem produzidos em fábrica sob controlos de qualidade;
- A sua rápida e simples instalação;
- Em muitos casos o seu uso é requerido por normas e regulamentos;
- São bastante competitivos em relação aos seus custos quando comparados com outros materiais;
- A sua pegada de carbono é muito menor quando comparada com outros materiais tradicionais.

3.3. Tipos de geossintéticos

Os geossintéticos dividem-se em várias categorias de acordo com os materiais a partir dos quais são obtidos ou da sua finalidade estrutural. Na figura 3.1 apresentam-se alguns tipos de geossintéticos:

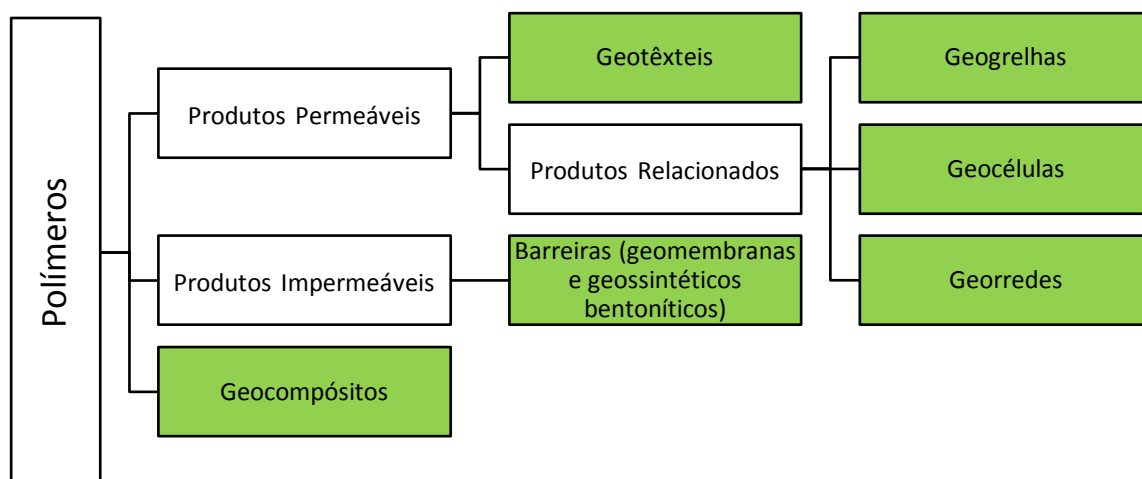


Figura 3.1 - Tipos de geossintéticos segundo a sua estrutura

Apresenta-se de seguida uma breve descrição dos diferentes tipos de geossintéticos, de acordo com IGS - Portugal, (2017 a):

- Geotêxteis – estes materiais, flexíveis e permeáveis, são de facto têxteis, mas são fabricados com fibras sintéticas em vez de fibras naturais. E por serem constituídos de fibras sintéticas, o tempo de degradação é muito elevado. Segundo o processo de fabrico, podem ser divididos em tecidos, não tecidos ou tricotados; são materiais porosos e que por isso são passíveis de ser atravessados por líquidos (figura 3.2 a));
- Geogrelhas – Estrutura plana, polimérica, constituída por uma grelha aberta e regular de elementos resistentes à tração, ligados entre si por extrusão, colagem ou entrelaçamento, cujas aberturas têm dimensões superiores às da superfície sólida da grelha formada pelos elementos constituintes. São designadas por uniaxiais (figura 3.3 a)) ou biaxiais (figura 3.3 b)), quando têm elevada resistência à tração em uma ou duas direções, respetivamente, ou ainda triaxiais (figura 3.4) um tipo de geogrelha que surgiu recentemente e que confere resistência radial a este material, impedindo não só distorções das aberturas, mas conferindo uma maior uniformidade de rigidez à tração no seu plano, em qualquer direção;
- Georredes – são materiais semelhantes às geogrelhas em termos de aparência, sendo que a diferença está na função que estes materiais desempenham, uma vez que as georredes têm usualmente como função conduzir grandes fluxos de fluídos ou gases (figura 3.2 b));
- Geomembranas – são mantas contínuas, flexíveis e impermeáveis, obtidas através de um ou mais materiais sintéticos, podendo ter uma superfície lisa ou rugosa (figura 3.2 c));
- Geocompósitos - na génese destes materiais, que resultam da associação de diferentes tipos de materiais, pelo menos um deles tem de ser um geossintético. Esta definição faz com que existam inúmeras combinações de diferentes materiais que podem ser associados, o que leva a uma vasta gama de aplicações (figura 3.2 d)).

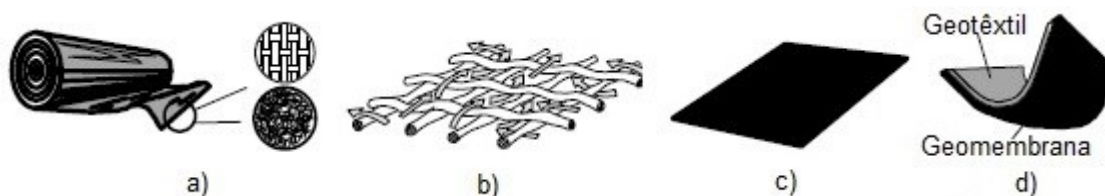


Figura 3.2 - Diferentes tipos de geossintéticos: a) Geotêxtil; b) Georrede; c) Geomembrana; d) Geocompósito
IGS - Portugal, (2017 a)

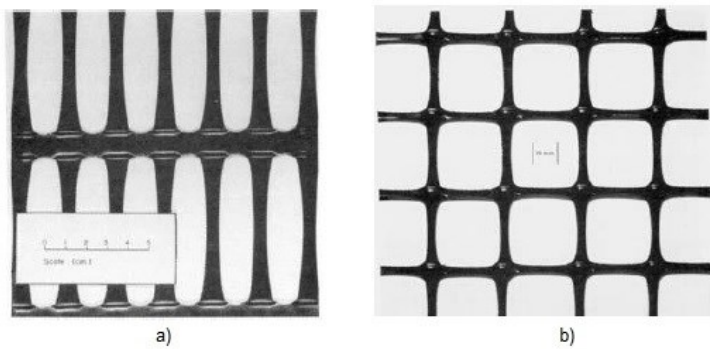


Figura 3.3 - a) Geogrelha Uniaxial; b) Geogrelha biaxial (Pinto, 2005)

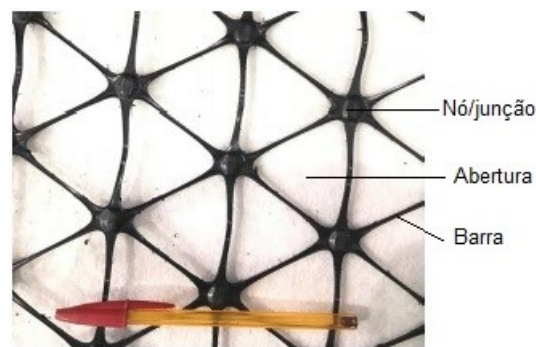


Figura 3.4 - Geogrelha triaxial (adaptado de Pires, (2018))

3.4. Funções dos geossintéticos

Na sua aplicação em obras de Engenharia Civil, os geossintéticos têm diversas funções, podendo ser aplicados com o objetivo de responder a uma só função, ou a várias em simultâneo.

As funções mais usuais são as de drenagem, filtragem, proteção, reforço, separação, controlo de erosão superficial e, mais recentemente tem-se vindo a utilizar os geossintéticos para uma função de estabilização dos solos. Todas estas funções vêm definidas em IGS - Portugal, (2017b), e de seguida irá ser dada uma breve explicação sobre cada uma delas:

A função de drenagem de um geossintético é como o próprio nome indica, a capacidade deste recolher e transportar fluidos, sejam eles líquidos ou gases, ao longo do seu plano, e usualmente em solos pouco permeáveis. Por exemplo, os geotêxteis têm sido usados para dissipar a pressão da água nos poros de aterros em vias rodoviárias, e os drenos verticais pré-fabricados têm sido usados para acelerar a consolidação de solos fracos sob aterros (figura 3.5 a)).

Os geossintéticos que têm como função a filtragem têm de ter aberturas que permitam a passagem dos fluidos, mas que ao mesmo tempo impeçam a passagem dos solos, numa direção perpendicular

ao seu plano (figura 3.5 b)). Estes materiais devem também ter uma boa flexibilidade para que se ajustem ao solo e evitem a migração de partículas para vazios criados entre o geossintético e o solo.

É, também, possível utilizar geossintéticos para uma função de separação; esta função tem o objetivo de fazer com que dois materiais distintos e com características distintas (como diferentes granulometrias) não se misturem, para que o seu funcionamento e integridade se mantenham ou que tenham inclusive algum melhoramento (figura 3.5 c)).

A utilização de geossintéticos para uma função de proteção advém da necessidade de proteger um determinado material ou elemento; o geossintético atua fazendo uma distribuição e uniformização de tensões ou deformações no material/elemento que queremos proteger.

A função de reforço consiste na utilização do geossintético para melhorar as propriedades mecânicas do solo ao qual está associado; sendo os geossintéticos materiais que têm a capacidade de resistir à tração, podem transmitir essa mesma capacidade a materiais que não a possuem. Esta função pode ser exercida em duas situações distintas: primeiro, quando são colocados na interface de duas camadas que estejam sujeitas a pressões diferentes, o geossintético utiliza a sua tensão para equilibrar a diferença de pressões; em segundo lugar, quando são utilizados no interior de maciços para suportar tensões de tração, aumentado a capacidade global da estrutura (figura 3.5 d)).

Utilizar geossintéticos para um controlo de erosão superficial é uma função que tem vindo a ganhar importância em aplicações de proteção de taludes e proteção costeira, entre outras. Os geossintéticos são colocados sobre os maciços, de maneira a que o protejam das ações de agentes degradadores, como as condições atmosféricas, poluição, etc (figura 3.5 e)).

Os geossintéticos podem atuar como barreiras relativamente impermeáveis para fluídos e gases. Por exemplo, como se observa na figura 3.5 f), as geomembranas são utilizadas como barreiras impedindo o fluxo de líquidos ou gases.

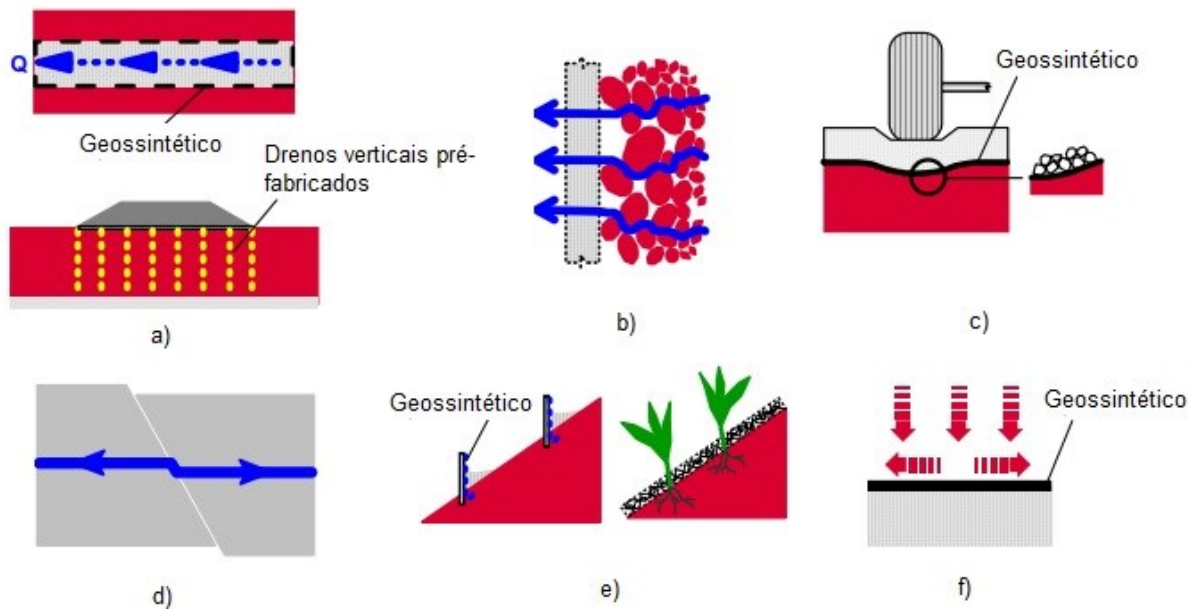


Figura 3.5 - Representações das diferentes funções dos geossintéticos: a) função de drenagem; b) função de filtro; c) função de proteção; d) função de reforço; e) função de controlo da erosão superficial; f) função de barreira de fluidos (IGS - Portugal, (2017b))

Como foi referido anteriormente, a função de estabilização lateral foi recentemente adicionada ao vasto lote de funções dos geossintéticos. É definida como um melhoramento do comportamento mecânico de um material granular não consolidado através da inclusão de uma ou de mais que uma camada de material geossintético, de maneira a que as deformações que surjam de cargas aplicadas sejam reduzidas, através da minimização dos movimentos do material granular (figura 3.6), como vem definido em EOTA TR041, (2012). Este melhoramento é obtido através dos mecanismos do imbricamento e do confinamento, de que falaremos mais à frente, no subcapítulo 3.7.4.

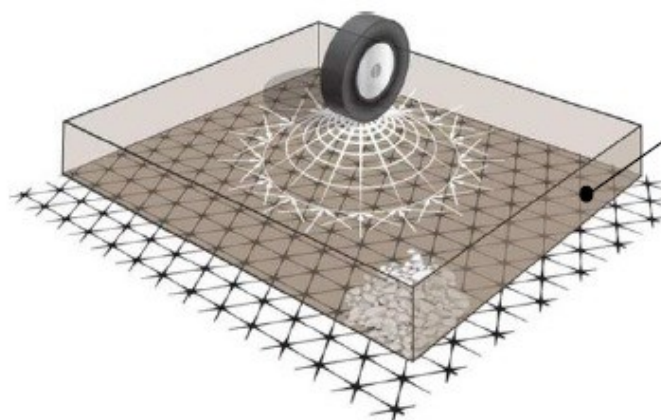


Figura 3.6 - Função de estabilização (adaptado de EOTA TR041, 2012)

Na tabela 3.1 relacionam-se os tipos de geossintéticos referidos no subcapítulo 3.3 com as suas funções primárias, abordadas neste subcapítulo.

Tabela 3.1 - Tipos de geossintéticos associados às suas funções (adaptado de Koerner, (1998))

Geossintético	Funções principais						
	Drenagem	Filtragem	Proteção	Reforço	Separação	Impermeabilização	Estabilização
Geotêxteis	✓	✓	✓	✓	✓		
Geogrelhas				✓			✓
Geocompósitos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Georredes	✓		✓				
Barreiras (geomembranas e geossintéticos bentoníticos)						✓	

3.5. Aplicações dos geossintéticos em vias-férreas

As funções mais comuns dos geossintéticos quando aplicados em vias-férreas incluem a separação de materiais com diferentes granulometrias, filtragem, drenagem e reforço do solo, como podemos observar na figura 3.7. São normalmente instalados dentro da camada de balastro, ou na interface desta com as camadas adjacentes (IGS - Portugal, 2017c).

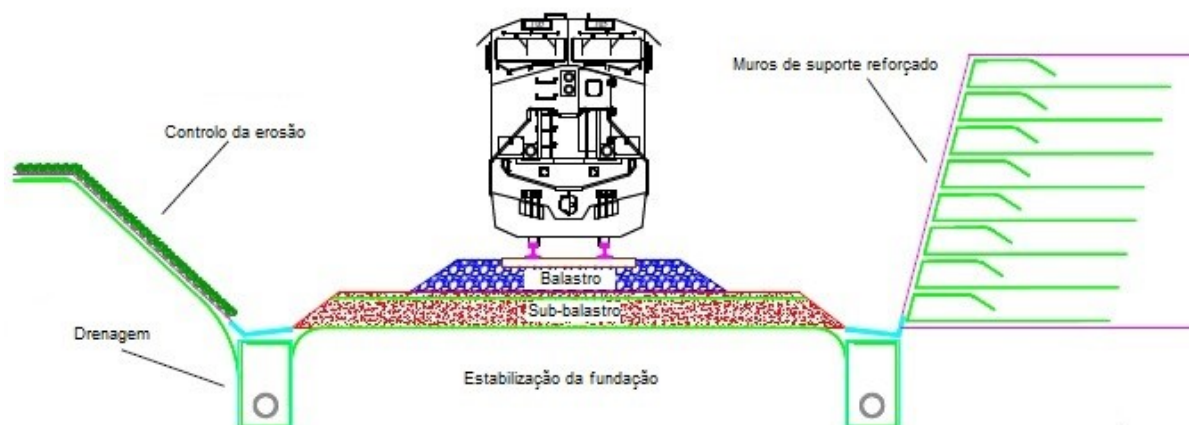


Figura 3.7 - Aplicações dos geossintéticos numa via-férrea (IGS - Portugal, 2017c)

Os tipos de geossintéticos mais utilizados para desempenhar estas funções em projetos ferroviários são os geotêxteis (separação e filtragem), as geogrelhas (reforço e/ou estabilização) e os geocompósitos (drenagem), destacando-se, neste trabalho, as funções de reforço e/ou estabilização desempenhadas pelas geogrelhas.

3.5.1. Mecanismos de funcionamento das geogrelhas

As geogrelhas podem ser aplicadas tanto na interface entre a camada de balastro e sub-balastro, com o objetivo de reduzir a deformação da via através da estabilização mecânica desta camada, como na interface da camada de sub-balastro com a fundação, para melhorar a fundação da via pela estabilização mecânica desta camada.

Quando a geogrelha é colocada na interface da camada de balastro (figura 3.8), os principais benefícios são, um aumento do período entre ciclos de manutenção, ou seja, do período entre a limpeza do balastro e as operações de reparação (Das, 2016).

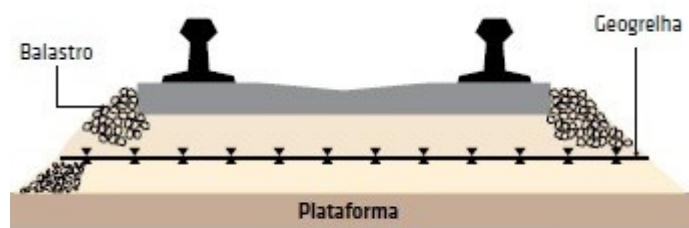


Figura 3.8 – Utilização de geogrelha na interface da camada de balastro e sub-balastro (adaptado de Das, 2016)

Já a utilização da geogrelha para a estabilização mecânica da camada de sub-balastro (figura 3.9) acontece normalmente quando existe a necessidade de trabalhar com plataformas com baixa capacidade portante, permitindo uma redução significativa da espessura desta camada, sem deixar de apoiar e sustentar a camada de balastro de uma forma eficiente (Das, 2016).

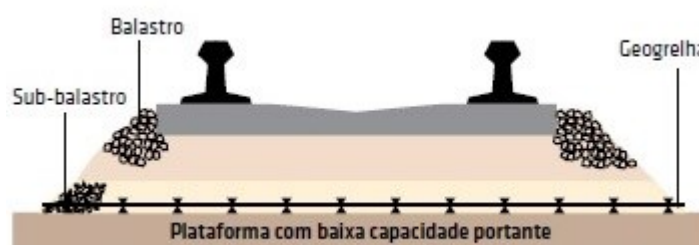


Figura 3.9 - Utilização da geogrelha na interface da camada de sub-balastro com a fundação (adaptado de Das, 2016)

De entre os mecanismos de reforço/estabilização geralmente atribuídos à interação entre a geogrelha e os agregados adjacentes, destacam-se, no âmbito da presente dissertação, o confinamento, o imbricamento e o efeito de membrana tensionada.

Para que ocorra confinamento (figura 3.10) é necessário que a geogrelha restrinja o movimento das partículas de balastro, minimizando assim as consequências deste movimento. É um efeito reativo,

ocorrendo apenas quando um carregamento é aplicado, e depois da ocorrência do imbricamento (Kawalec, 2017).

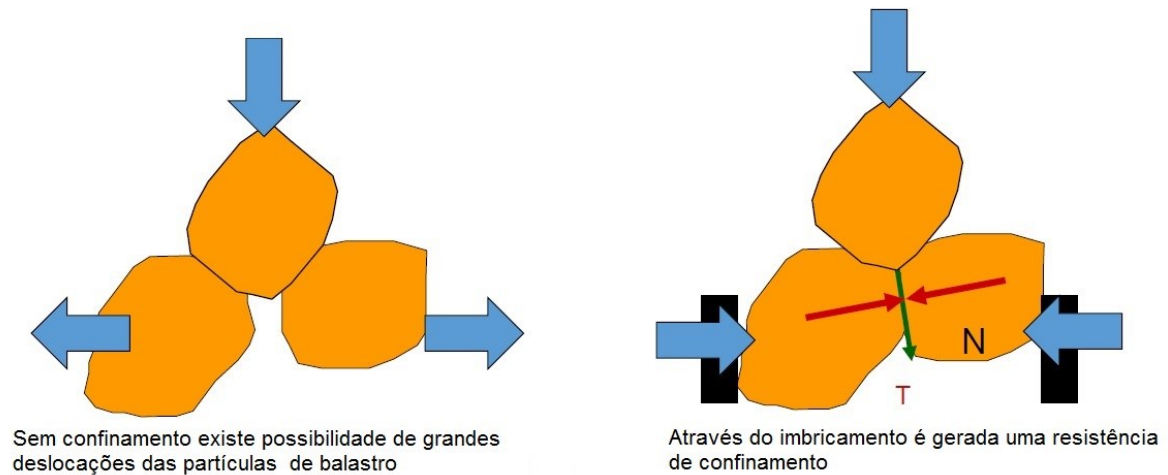


Figura 3.10 – Confinamento (adaptado de Kawalec, 2017)

O confinamento vê os seus efeitos reduzidos com o aumento da distância até à geogrelha, até chegar a um ponto em que os seus efeitos são inexistentes, ficando a restrição dos movimentos apenas ligada ao atrito, como é possível observar na figura 3.11.

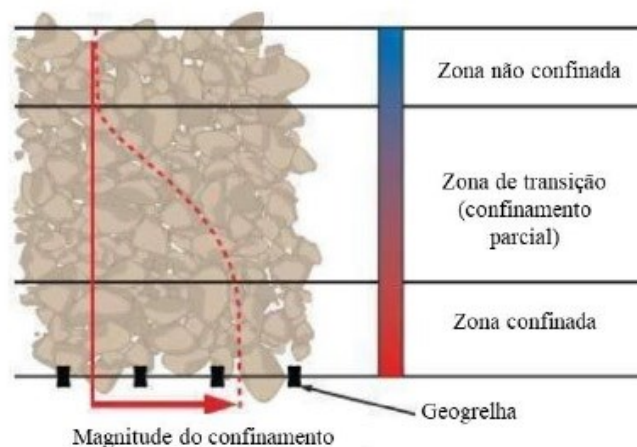


Figura 3.11 - Magnitude do efeito de confinamento (Pires, 2018)

A principal característica das geogrelhas, que permite o desenvolvimento destes mecanismos, é a relação entre a sua abertura e a dimensão do agregado. Quando as partículas granulares (por exemplo, o balastro ou sub-balastro) sofrem compactação, penetram parcialmente através das aberturas da geogrelha gerando o mecanismo de imbricamento figura 3.12, que faz com que a geogrelha consiga resistir aos esforços horizontais de tração do material granular, impedindo o movimento lateral do mesmo, que como vimos anteriormente, é um dos principais motivos dos assentamentos em ferrovias.

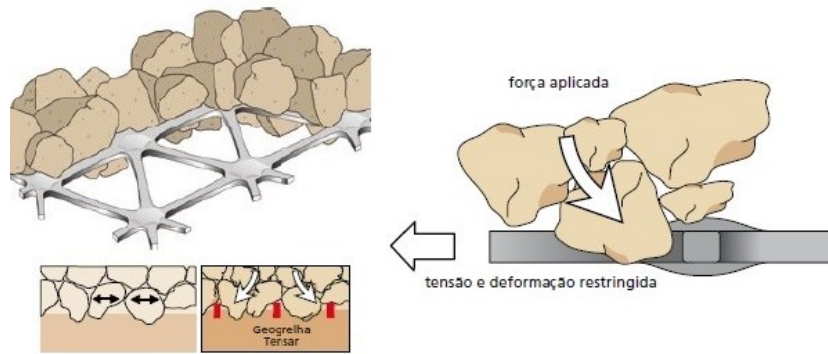


Figura 3.12 – Representação do mecanismo de imbricamento (Tensar, 2012)

Para além do confinamento e imbricamento, outro mecanismo associado ao reforço e estabilização de vias-férreas, é o efeito de membrana tensionada. Para que este efeito seja ativado, o geossintético deve já estar significativamente deformado, seja pela passagem de material circulante e/ou pelo peso das camadas superiores. Como tal, este é um mecanismo que se desenvolve maioritariamente quando ocorrem grandes deformações ao nível da fundação (Tavares, 2009).

A combinação dos esforços de tração com a curvatura da georelha modificam a tensão atuante na camada reforçada (figura 3.13). Nos locais sob solicitação, a curvatura gerada pelo material de reforço, proporciona a redução das tensões verticais aplicadas à camada subjacente, melhorando a capacidade de carga da estrutura. Fora dos locais solicitados, a curvatura do reforço proporciona tensões verticais adicionais à superfície, contribuindo para um aumento do confinamento do solo nessa região (Tavares, 2009).

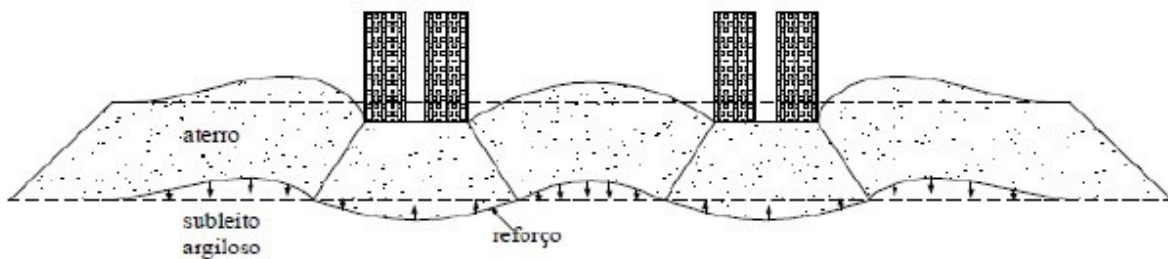


Figura 3.13 - Representação do efeito de membrana numa estrada não pavimentada (Tavares, 2009)

Diferentes tipos de georelhas, bem como alguns tipos de geotêxteis, são capazes de gerar este mecanismo. No entanto, no caso do reforço/estabilização de vias-férreas normalmente não faz parte dos objetivos de dimensionamento, já que os níveis de deformação necessários para o gerar estão normalmente fora dos limites admissíveis para as deformações nestas vias. Por estes motivos, procura-se geralmente este mecanismo em aterros de grande altura e/ou aterros suportados por estacas ou colunas de *jet grouting* encabeçadas por geossintéticos (Tavares, 2009).

A tabela 3.3 resume os requisitos necessários para o dimensionamento de geogrelhas em vias-férreas, em função dos diferentes objetivos para os quais são dimensionadas.

Tabela 3.2 - Requisitos das geogrelhas para o desempenho das funções de reforço e estabilização (adaptado de (Kawalec, 2017))

	Função	
	Estabilização	Reforço
Requisitos	Contenção lateral	Membrana tencionada
	Redução dos deslocamentos horizontais dos agregados	Comprimento de ancoragem
	Confinamento do agregado	Atrito
	Imbricamento	Resistência à tração

No âmbito da presente dissertação destacam-se as propriedades físicas e mecânicas associadas às geogrelhas, em especial a rigidez e o imbricamento.

3.6. Propriedades dos geossintéticos

As propriedades dos materiais geossintéticos e os ensaios efetuados para determinar os valores das mesmas, surgiram com os primeiros materiais que se assemelhavam a geossintéticos. À medida que as funções e aplicações destes materiais foram evoluindo, as suas propriedades e os respetivos ensaios seguiram esta evolução.

Os geossintéticos possuem propriedades físicas, mecânicas, hidráulicas ou de durabilidade. Para os materiais mais utilizados em reforço, as propriedades mecânicas são as mais relevantes, enquanto materiais utilizados em funções de filtragem ou drenagem, dependerão mais das suas propriedades hidráulicas. Como as aplicações de geossintéticos envolvem transporte e armazenamento de materiais, construções em condições adversas e um tempo de serviço relativamente grande, as propriedades de durabilidade são também bastante importantes (Lopes, 2010).

No âmbito do presente trabalho destacam-se as propriedades mecânicas, relacionadas com aplicações onde seja requerido aos materiais geossintéticos que resistam a cargas ou deformações, e físicas, associadas à composição dos materiais usados no fabrico dos geossintéticos, e incluem o tipo de estrutura, peso específico, massa por unidade de área, a espessura.

Entre as propriedades físicas e mecânicas necessárias para um adequado desempenho da função de reforço/estabilização, temos (Lopes, 2010):

- Resistência à tração e módulo de deformabilidade;
- Fluência e relaxação mínimas para evitar a perda de eficácia do reforço com geossintéticos ao longo da vida útil da obra;
- Resistência ao rasgamento e à perfuração, para evitar a ocorrência de descontinuidades físicas no material;
- Flexibilidade;
- Resistência à abrasão.

Para o caso de estudo que será apresentado no capítulo 5, as propriedades mais importantes são a espessura e a resistência à tração, as quais serão apresentados em mais pormenor nos subcapítulos seguintes.

3.6.1. Espessura

A espessura de uma geogrelha corresponde à distância medida entre as superfícies superior e inferior do material, quando é aplicada sobre este uma determinada pressão (que varia de acordo com o geossintético). Esta propriedade é bastante importante por influenciar outras propriedades, como a massa por unidade de área e os valores das propriedades mecânicas (Carneiro, 2009).

Os ensaios para a determinação das espessuras dos geossintéticos são realizados segundo a norma ISO 9863-1: 2016, onde é descrito um método - aplicável a todos os geossintéticos - em que os materiais são sujeitos a diferentes pressões (de 2 kPa, 20 kPa e 200 kPa) e se define a pressão correspondente à espessura nominal que deve ser determinada. Usualmente, a espessura nominal é determinada quando se aplica uma pressão de $2,00 \pm 0,01$ kPa aos materiais, a pressão mínima exigida para ensaios de controlo de qualidade para este tipo de materiais. Devem ser ensaiados pelo menos 10 provetes, sendo que os resultados finais são expressos pelos valores médios individuais de cada provete para cada pressão ensaiada e pelo respetivo desvio padrão e/ou coeficiente de variação.

3.6.2. Resistência à tração

Como foi referido anteriormente, a resistência à tração é provavelmente a propriedade mais importante quando o objetivo é utilizar geossintéticos como material de reforço. É uma propriedade que depende do tipo de polímero e do processo de fabrico do material. Geralmente é aferida realizando ensaios de tração-extensão segundo a norma NP EN ISO 10319 – Ensaio de tração em tiras largas. Esta norma aplica-se a geogrelhas ortogonais, uniaxiais ou biaxiais, e as propriedades de tração são determinadas na direção de fabrico (0°) e na direção perpendicular a esta (90°), como podemos ver na figura 3.14.

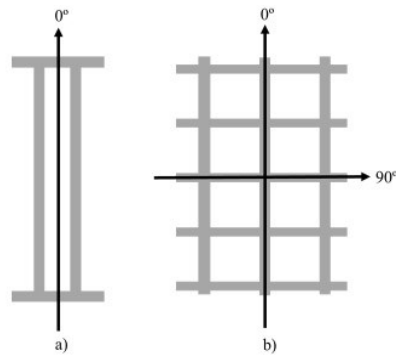


Figura 3.14 - a) Direção de ensaio para uma geogrelha uniaxial; b) direção de ensaio para uma geogrelha biaxial (Pires, 2018)

Já para as geogrelhas triaxiais, a norma de ensaio é a mesma, mas com várias adaptações na metodologia do ensaio, definidas no documento técnico EOTA TR041, (2012). Assim, este documento define que para determinar as propriedades de tração das geogrelhas triaxiais são realizados ensaios em 4 direções: duas direções que coincidem com o meio das barras da geogrelha (a 0° e a 60°) e duas direções coincidentes com as barras (30° e 90°) (figura 3.15).

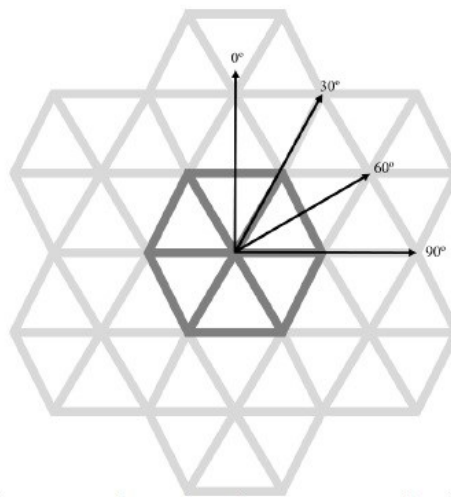


Figura 3.15 - Direções de ensaio numa geogrelha triaxial (Pires, 2018)

Deste ensaio resulta, entre outras coisas, uma curva que relaciona a força por unidade de largura (em kN.m^{-1}) com a extensão (em %). Dividindo a força por unidade de largura pela espessura do material, faria com que os resultados viessem expressos em tensões, mas este é um procedimento que não se realiza frequentemente, porque a espessura dos geossintéticos é difícil de definir já que varia com a carga aplicada (Sarsby, 2006).

O ensaio de tração-extensão realiza-se fixando - com as garras do equipamento de ensaio à tração - um provete ao longo de toda a sua largura (ao longo das linhas C e D da figura 3.16), aplicando de seguida uma força longitudinal a uma velocidade constante, até que ocorra a rotura no provete.

Segundo a norma, a dimensão dos provetes para a realização do ensaio é de 200mm de largura e 100mm de comprimento entre as garras, para qualquer que seja o tipo de geossintético. É depois realizado o ensaio descrito anteriormente, medindo a deformação nos provetes com recurso a um extensómetro e dois pontos de referência definidos no provete. Estes pontos situam-se no eixo de simetria do provete (pontos A e B na figura 3.16), colocados paralelamente à carga aplicada, sendo que no caso das geogrelhas, a distância entre pontos deve ser adaptada para que incluía pelo menos uma fiada de nós (ISO 10319, 2008).

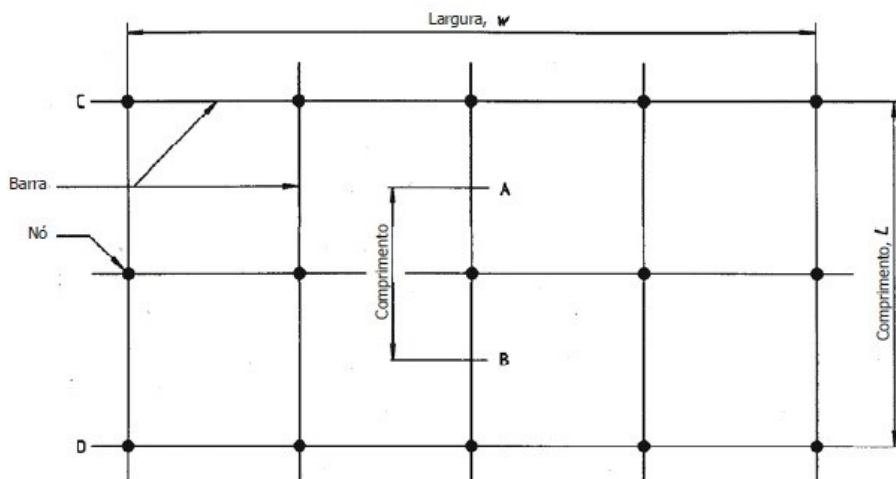


Figura 3.16 - Esquema do provete utilizado no ensaio à tração de uma geogrelha típica (ISO 10319, 2008)

Os equipamentos utilizados para a execução deste tipo de ensaios, possuem hoje em dia *software* capaz de fornecer os valores da resistência à tração do provete e da correspondente extensão na força máxima, bem como dos dados necessários para a representação de uma curva carga aplicada-extensão (figura 3.17).

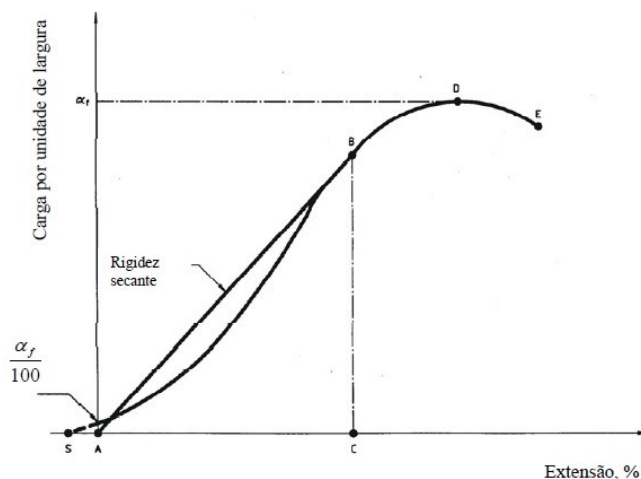


Figura 3.17 - Curva típica carga-extensão (ISO 10319, 2008)

É o tratamento destes dados, que permite calcular parâmetros como os valores médios da resistência à tração e extensão na força máxima, desvio padrão/coeficiente de variação, rigidez secante média para diferentes extensões e robustez média (Carneiro, 2009).

3.7. Resumo do capítulo

Este capítulo foi dedicado aos geossintéticos, com destaque para o seu desenvolvimento enquanto material e para a importância que tem tido em engenharia civil. Apresentaram-se os tipos de geossintéticos mais utilizados, as funções que estão associadas a cada um, as propriedades inerentes para o desempenho dessas mesmas funções e, também, as aplicações destes materiais em projetos ferroviários.

Descreveram-se os mecanismos de funcionamento das geogrelhas – imbricamento, confinamento e membrana tensionada – e a sua importância para o desempenho das funções deste material.

Por último, foram abordadas em maior detalhe as propriedades físicas e mecânicas das geogrelhas, e as normas de ensaios usadas para a sua caracterização, nomeadamente a espessura e a resistência à tração.

4. Revisão bibliográfica

4.1. Introdução

Neste capítulo irá ser realizada uma revisão bibliográfica, que terá o seu foco, em primeiro lugar, na utilização dos *softwares* LS-DYNA e ANSYS, como ferramentas para o estudo da via-férrea e, posteriormente, na utilização de diferentes métodos numéricos para o estudo do comportamento da via-férrea reforçada/estabilizada com geossintéticos, com destaque para os que utilizaram geogrelhas.

4.2. Utilização do LS-DYNA como ferramenta para o estudo da via-férrea

Ao longo dos anos tem havido vários estudos que utilizam o LS-DYNA como ferramenta para tentar compreender o funcionamento da via-férrea e de alguns dos seus componentes.

Gardien e Stuit (2003) utilizaram três submodelos de uma via em túnel: um modelo estático, um modelo dinâmico e um modelo de propagação, fazendo variações não só dos próprios modelos como também das propriedades dos materiais constituintes da via - o tamanho dos elementos, a rigidez do solo, o amortecimento e as condições de fronteira -, dos *softwares* de elementos finitos - foram realizadas modelações utilizando o LS-DYNA e o ANSYS. Foi então analisada a resposta da passagem do comboio no túnel, tendo sido obtido através do modelo estático valores de rigidez que foram depois usados como parâmetros de entrada no modelo dinâmico. Do modelo dinâmico foram posteriormente obtidas as forças do sistema mola/amortecedor entre as travessas e o túnel, tendo estas forças sido utilizadas como cargas no modelo de propagação. As conclusões mais relevantes deste estudo são relativas às condições de fronteira – fronteiras não refletoras são utilizadas para que as ondas se possam dissipar -, e relativamente aos *softwares* utilizados: as diferenças entre os resultados são muito pequenas e portanto os autores afirmam que a escolha do *software*, para este tipo de análise, não deve ter grande influência nos resultados finais.

Com o objetivo de estudar os assentamentos da via Lundqvist e Dahlberg (2004) propuseram um modelo dinâmico da via/veículo, tendo para esse efeito criado um modelo simétrico tridimensional da via onde modelaram o balastro como um meio contínuo, as rodas e as travessas como corpos rígidos, as palmilhas como um material elástico pré-definido no *software*, e em que as cargas aplicadas na via vêm das rodas em movimento, que são carregadas por uma força constante correspondente ao peso da carruagem. Os autores referem um problema ao modelar a camada de balastro, causado pelo facto de tanto esta camada como o meio envolvente serem infinitos, e no modelo numérico estarem representados como finitos. Para contornar esta situação foram utilizadas condições de fronteira não refletoras, que absorvem a pressão e as ondas transversais. Os autores concluíram que mesmo utilizando modelos de materiais simples, os assentamentos da via e o aparecimento de travessas suspensas – fenómeno que ocorre devido a movimentos laterais e longitudinais das travessas, afastando o balastro por baixo destas para outros lados - são possíveis de modelar, e que desde que

sejam utilizadas as condições de fronteira não refletoras, o LS-DYNA pode ser utilizado para investigar problemas dinâmicos da interação via/veículo.

Wen et al. (2005) utilizaram o ANSYS/LS-DYNA para simular o comportamento contacto/impacto do sistema roda-carril na zona das juntas do carril. O objetivo deste estudo foi o de encontrar métodos que ajudassem a eliminar ou diminuir a resposta dinâmica entre o carril e a roda, motivo já referenciado como um dos principais causadores de deterioração da via-férrea. Foi então estabelecido um modelo tridimensional de elementos finitos para analisar o modelo contacto/impacto, baseado num modelo discreto de suporte elástico. As conclusões deste estudo são: 1) a influência da máxima força vertical é sentida maioritariamente na cabeça do carril; 2) o conjunto roda/carril é separado depois do primeiro impacto, o que pode levar a descarrilamentos; 3) aumentos das cargas nos eixos levam a aumentos das cargas dinâmicas e a aumentos da máxima tensão efetiva; 4) a velocidade de circulação dos veículos tem pouca influência nas cargas dinâmicas; 5) o aumento da tensão efetiva e da deformação plástica pode levar ao aparecimento de fendas por fadiga na cabeça dos carris.

Klasztorny e Szurgott (2012) desenvolveram no seu estudo uma nova metodologia para a modelação e simulação em MEF de um sistema composto por uma via balastrada, um viaduto com 14,4m de vão situado na Polónia e dois tipos diferentes de comboios de alta velocidade. Utilizando o *software* LS-PrePost (*software* de pré-processamento ligado ao LS-DYNA), os autores utilizaram módulos existentes neste programa para simular a interação entre o comboio em movimento e a via; os sistemas de fixação foram simulados utilizando elementos discretos unidimensionais (molas e amortecedores) enquanto para os carris foram utilizados elementos de viga; todos os elementos que compõem as carruagens foram considerados como corpos rígidos. Foram ainda adotadas algumas simplificações na criação do modelo, como a retilinearidade da via e a inexistência de irregularidades, bem como a simetria da superestrutura da ponte. Os resultados deste estudo foram posteriormente validados experimentalmente num estudo realizado pelos mesmos autores, ficando desta forma provada a utilização prática do LS-DYNA para a modelação e simulação deste tipo de sistemas. Foi também provado o sobredimensionamento do viaduto e detetadas tensões efetivas concentradas nos bordos inferiores das vigas principais. Por último, os autores concluíram que a resposta dinâmica da ponte era de uma natureza quase estática (fora das zonas de ressonância), mas que os esforços tinham variações muito rápidas ao longo do tempo e amplitudes relativamente grandes, sendo por isso necessário dimensionar a estrutura para altos ciclos de fadiga.

Rosenberger et al. (2016) estudaram um método que combinava modelação numérica e medições no terreno para analisar assentamentos diferenciais em zonas de transição, em duas vias balastradas e uma via em laje. O modelo numérico utilizado por Rosenberger et al. (2016) faz uso de elementos de contato para modelar as conexões entre as travessas e o balastro e utiliza a teoria Hertziana para simular a interação roda-carril. Os autores concluíram que o modelo criado pode ser usado para analisar o comportamento dinâmico de zonas de transição onde ocorram assentamentos diferenciais

ou o fenômeno das travessas suspensas, já que com este modelo obtiveram resultados bastante satisfatórios quando comparados com as medições feitas no terreno.

Wang et al. (2017) realizaram um estudo para tentar aferir em que medida o nível de humidade do balastro influenciava a degradação da via-férrea nestas zonas tidas como críticas. No terreno, foi utilizado um radar de prospeção no solo para medir o nível de humidade do balastro e do sub-balastro em três zonas de transição distintas. A relação entre o nível de humidade e a degradação da via foi aferida comparando esse mesmo nível com o alinhamento longitudinal da via, medido pelos veículos de inspeção da mesma. O comportamento dinâmico das zonas de transição com altos níveis de humidade foi depois analisado com recurso ao LS-DYNA. O balastro e o sub-balastro foram modelados como elementos sólidos e as condições de humidade elevada foram tidas em conta reduzindo o módulo de elasticidade em aproximadamente 50%. Como resultado, este estudo numérico revelou um aumento de 0,2% para 2,6% das cargas dinâmicas provocadas pelas rodas, quando comparadas com os casos de referência. Como estes autores já tinham demonstrado que o aumento das cargas dinâmicas leva a um aumento da degradação da via, puderam assim concluir que o alto teor de humidade no balastro e sub-balastro contribuem para uma mais rápida deterioração da mesma.

4.3. Principais estudos numéricos realizados com geossintéticos

Indraratna e Nimbalkar (2013) com o objetivo de estudar, entre outros assuntos, os assentamentos da camada de balastro, realizaram um modelo numérico bidimensional de elementos finitos e vários ensaios cíclicos em câmaras triaxiais em laboratório, utilizando uma geogrelha biaxial, um geotêxtil, e um geocompósito formado pela combinação da geogrelha com o geotêxtil, colocados em diferentes pontos do modelo. Os autores concluíram que tanto a geogrelha como o geotêxtil contribuíram para a redução do assentamento, para a redução do movimento horizontal das partículas e para uma redução na desfragmentação do balastro, tendo a geogrelha um melhor desempenho que o geotêxtil devido ao fenômeno do imbricamento. Contudo, a geogrelha demonstrou um pior desempenho quando utilizada entre a camada de sub-balastro e o solo adjacente, excetuando o caso em que foi utilizada em conjunto com o geotêxtil. Assim sendo, a solução que utiliza a geogrelha na interface balastro-sub-balastro e o geocompósito na interface do sub-balastro com o solo foi a que apresentou melhores resultados na redução do assentamento. Outra das conclusões do estudo foi o fato de ter ficado provado que o modelo numérico 2D conseguiu prever a degradação da tensão-deformação da via reforçada e não reforçada quando esta é sujeita a cargas cíclicas.

Qian et al. (2013) promoveram um estudo onde pretendiam medir o nível de deformação permanente do balastro, utilizando um modelo numérico tridimensional de elementos discretos e ensaios triaxiais em laboratório. Foram utilizados dois tipos de geogrelhas neste estudo, biaxiais e triaxiais, concluindo os autores que ambas diminuíram a deformação permanente do balastro, sendo que a triaxial foi a que apresentou valores de deformação permanente mais baixos. O modelo numérico veio, posteriormente, confirmar os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, o que levou os autores a concluir que este

tipo de modelos baseados em elementos discretos são ferramentas uteis para prever as interações das geogrelhas com o balastro.

Mishra et al. (2014) estudaram qual a posição ideal para a colocação de geogrelhas biaxiais e triaxiais. Com essa finalidade criaram um modelo numérico tridimensional de elementos discretos e realizaram ensaios em câmaras triaxiais de larga escala (em laboratório) utilizando provetes cilíndricos com balastro selecionado. Tanto o modelo numérico como os ensaios laboratoriais demonstraram que a colocação de uma geogrelha a 254 mm do topo da amostra, e outra a 254 mm do fundo da mesma, resultou no pico máximo dos ganhos para as forças de corte, tanto para a geogrelha biaxial como para a triaxial. Tal comportamento deve-se ao facto da geogrelha, quando colocada nestes planos, interseccionar a superfície de rotura, prevenindo assim o movimento lateral das partículas de balastro, levando ao aumento das forças de corte.

Ngo et al. (2014) estudaram a influência que balastro contaminado com partículas de carvão poderia ter no desempenho da camada, quando esta era reforçada com uma geogrelha biaxial. Para esse efeito, foi realizado um modelo numérico tridimensional de elementos discretos e ensaios de corte em laboratório, utilizando balastro limpo e balastro contaminado. Os resultados obtidos através do modelo numérico foram bastante coerentes quando comparados com os resultados dos ensaios laboratoriais, tanto para o comportamento volumétrico do balastro como para as tensões de corte. O balastro contaminado apresentou um pico mais baixo na tensão de corte que o balastro limpo, mas uma dilatação maior. Este comportamento foi atribuído às poeiras de carvão no balastro contaminado causarem uma diminuição do atrito entre as partículas de balastro, o que leva a uma diminuição do fenómeno do imbricamento e conseqüentemente a uma diminuição das tensões de corte. Assim sendo, o conjunto balastro fresco-geogrelha apresentou melhores resultados para as tensões de corte do que o conjunto balastro contaminado-geogrelha.

Ngo e Indraratna (2016) estudaram de que forma a utilização de uma geogrelha biaxial influenciaria o desempenho da subestrutura da via-férrea, através do estudo do fenómeno do imbricamento. Os autores levaram a cabo um modelo numérico tridimensional de elementos discretos em conjunto com ensaios de corte direto, ensaios com o defletómetro de impacto ligeiro e um dispositivo de simulação do comportamento da via. Ficou provado que o fenómeno do imbricamento das partículas de balastro com a geogrelha é o principal fator responsável pelo aumento do desempenho de uma via balastrada, quando estabilizada com estes materiais. Os resultados obtidos através do modelo numérico estão em conformidade com os ensaios de laboratório, provando a sua adequabilidade para representar com precisão o comportamento do balastro.

Yap et al. (2017) realizaram uma análise numérica tridimensional com elementos finitos para inferir a influência dos geossintéticos e da colocação de aterro no desempenho de um troço de via balastrada. Para avaliar o aumento/diminuição do desempenho da via foram analisados os assentamentos e a capacidade de suporte. O geossintético utilizado foi uma geogrelha, não especificando os autores de

que tipo, fornecendo apenas a informação em relação à sua rigidez axial e dizendo que foi modelada como sendo um material permeável. Os autores concluíram que a geogrelha tem efeitos consideráveis na diminuição dos assentamentos e na capacidade de suporte da via. Para além destas conclusões, os autores indicaram que: a posição mais adequada e prática para a colocação da geogrelha será na interface do balastro com as camadas inferiores adjacentes (figura 4.1); os efeitos da utilização deste tipo de material são maiores quanto pior for a qualidade das camadas de solo onde a estrutura da via assenta; com o pré-dimensionamento da geogrelha adequado, se elimina/diminui a necessidade da utilização de colocação de aterro.

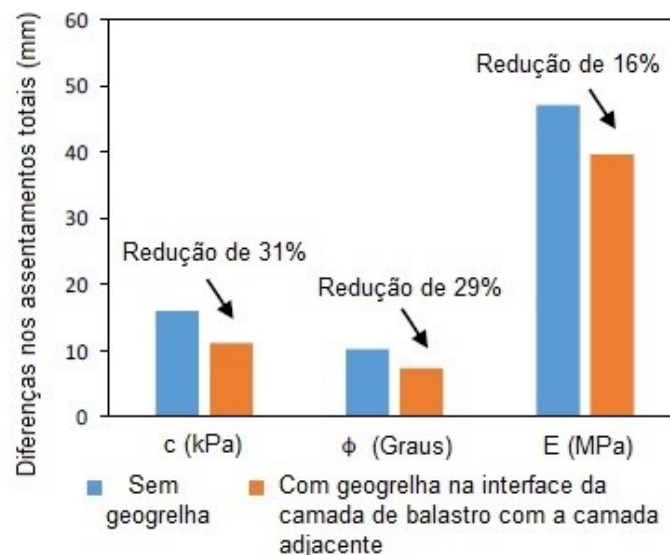


Figura 4.1 - Diferenças nos assentamentos totais, nos casos com e sem geogrelha, em termos de: c - coesão; ϕ - ângulo de fricção; E - módulo de deformabilidade (adaptado de (Yap et al., 2017))

Indraratna et al. (2018) utilizaram a modelação numérica tridimensional com elementos finitos juntamente com ensaios de corte e triaxiais de larga escala e ensaios de campo, para estudar a degradação do balastro, as deformações permanentes e transientes, os deslocamentos horizontais do balastro, e também que tensões o tráfego de veículos induz em vias reforçadas com geogrelhas biaxiais (quadrangulares e retangulares) e triaxiais, pneus de borracha como camada de coroamento, bem como balastro fresco e contaminado. Os resultados dos ensaios de corte com balastro fresco indicam que qualquer uma das geogrelhas utilizadas levam a um aumento das forças de corte e do ângulo aparente de resistência ao corte, diminuindo apenas ligeiramente os assentamentos verticais do conjunto balastro-geogrelha. Contudo, quando o balastro utilizado foi o contaminado (com impurezas de carvão), os benefícios da geogrelha baixaram proporcionalmente ao aumento do nível de contaminação. Os autores concluíram que a dimensão das aberturas que maximiza as forças de corte nas interfaces é de $1,20 \cdot D_{50}$ (dimensão média do agregado). O modelo numérico foi utilizado para avaliar o deslocamento lateral do balastro e as tensões aplicadas no solo com e sem a camada de pneus de borracha (modelados como cilindros perfeitos) a reforçar a camada de coroamento. A utilização dos pneus de borracha teve uma grande contribuição na redução no espalhamento lateral das partículas e conseqüentemente, na dilatação do sub-balastro. No entanto, este estudo teve os seus

resultados mais encorajadores nos ensaios de campo em que foram utilizadas diferentes tipos de geogrelhas com um tapete de borracha, onde se demonstrou: que a inclusão das geogrelhas fez com que houvesse uma diminuição dos assentamentos no balastro em cerca de 35%; a colocação de tapetes de borracha que absorvam os choques (particularmente em solos mais rígidos) leva a uma maior resiliência, estabilidade e longevidade da via.

4.4. Resumo do Capítulo

Neste capítulo apresentou-se uma revisão dos estudos relativos a vias-férreas e que tenham utilizado o LS-DYNA na sua modelação, para melhor perceber o funcionamento do *software* neste tipo de situações, e de estudos em que a via-férrea foi modelada numericamente em conjunto com geossintéticos.

Verificou-se que os dois métodos numéricos mais utilizados para este fim são o método de elementos finitos e o método de elementos discretos. Estes dois métodos numéricos, em conjunto com ensaios laboratoriais, foram utilizados com o objetivo de estudar:

- Assentamentos da via-férrea;
- A influência de geogrelhas biaxiais e triaxiais no desempenho da via-férrea;
- A posição ideal para a colocação da geogrelha e a dimensão das suas aberturas;
- O deslocamento horizontal da camada de balastro;
- A influência da utilização de balastro contaminado no desempenho da via-férrea;

As principais conclusões dos autores destes estudos foram:

- Os modelos numéricos de elementos discretos são mais adequados para caracterizar o comportamento da camada de balastro (como por exemplo, o imbricamento, a influência do balastro contaminado e a deformação permanente do balastro) devido à natureza discreta deste material, mas os modelos numéricos de elementos finitos também podem ser utilizados com sucesso, como demonstraram Indraratna et al. (2018);
- Geogrelhas triaxiais foram as que obtiveram melhor desempenho na diminuição dos assentamentos;
- Os efeitos positivos da utilização das geogrelhas são menores quando o balastro está contaminado com impurezas;
- A posição ideal para a colocação da geogrelha é na interface da camada de balastro com a camada de sub-balastro.

Com base no exposto, verifica-se que a influência de geogrelhas triaxiais no reforço e estabilização da via, considerando balastros de diferentes qualidades ao longo de um troço da via e, analisado através dos deslocamentos horizontais e verticais dos carris e também dos deslocamentos

horizontais da camada de balastro, carece, ainda, de estudo, pelo que no capítulo seguinte será apresentado um caso de estudo com o objetivo de aprofundar o conhecimento neste domínio.

5. Modelação Numérica

5.1. Introdução

Neste capítulo irá ser apresentado o trabalho numérico realizado com o objetivo de estudar a influência das geogrelhas triaxiais nos deslocamentos de um troço de via-férrea com balastros de diferentes qualidades na sua composição.

Em primeiro lugar irá ser descrito o caso de estudo. Em segundo lugar irá ser descrito o modelo numérico utilizado, incluindo os trabalhos prévios de calibração deste modelo. Optou-se por utilizar um *software* de elementos finitos, o LS-DYNA, por ser o disponibilizado pela FCT, mas também por estudos anteriores terem evidenciado a adequabilidade do MEF para o estudo de assentamentos (Indraratna et al., 2018), entre outros detalhados no capítulo anterior. Por último irão ser apresentados e discutidos os resultados.

5.2. Caso de estudo

5.2.1. Descrição do caso de estudo

Nesta dissertação iremos comparar os deslocamentos verticais e horizontais da via, num troço de via-férrea reforçado com geogrelhas triaxiais, quando utilizados balastros de diferentes qualidades ao longo do modelo, como mostra a figura 5.1:

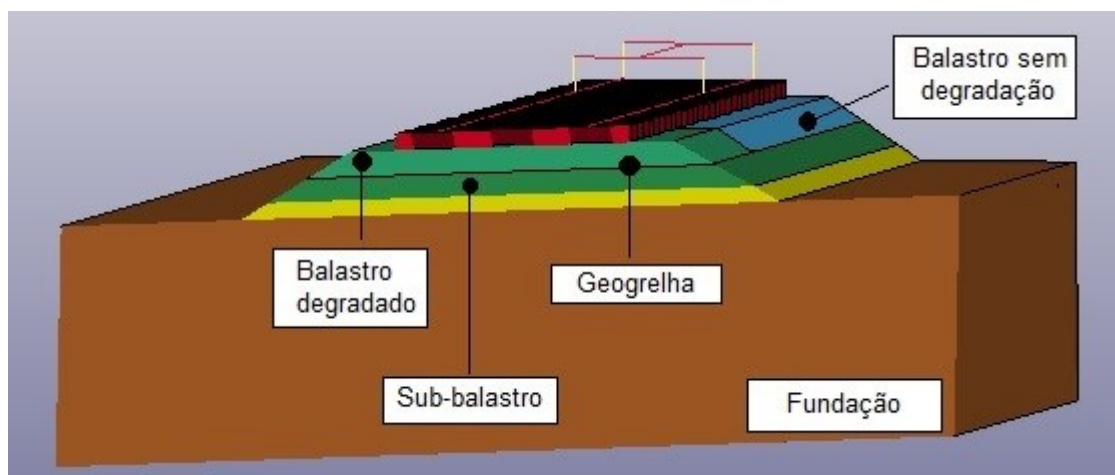


Figura 5.1 - Corte do modelo tridimensional

O modelo foi inicialmente concebido com apenas 12m de comprimento por 10m de largura. Mas com o objetivo de obter uma resposta mais estável do sistema, o comprimento foi aumentado para 18m (figura 5.2). Foi ainda testado um comprimento de 24m, mas devido ao tempo de computação muito superior para esta análise, acabou por não ser utilizado (tabela 5.1).

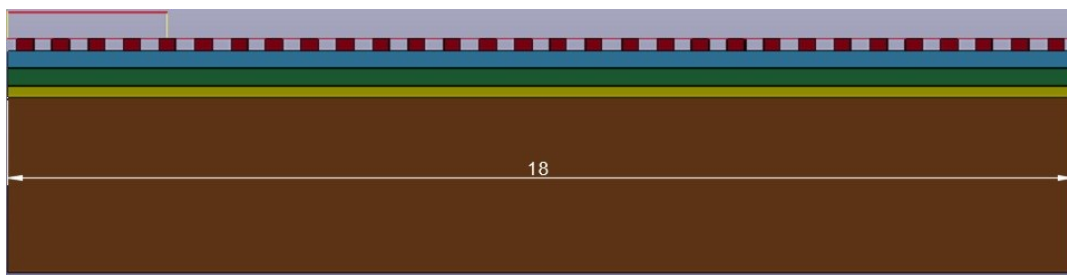


Figura 5.2 - Comprimento do modelo

Tabela 5.1 - Tempos de computação em função do comprimento do modelo

Comprimento do modelo [metros]	Tempo de computação (valores aproximados) [minutos]
12	15
18	30
24	75

Este modelo tridimensional de elementos finitos foi implementado utilizando elementos sólidos para modelar as travessas, o balastro, o sub-balastro, a camada de coroamento e a fundação, e elementos do tipo viga para modelar os carris. Os carris estão ligados a cada travessa através do sistema de fixação, modelado através de elementos mola-amortecedor, na direção vertical.

Os movimentos de rotação são restringidos impondo deslocamentos laterais iguais nos nós dos elementos mola-amortecedor. Com o fim de se evitarem picos concentrados demasiado elevados nas travessas, os deslocamentos verticais destas, debaixo dos carris, são previamente restringidos.

Para a realização deste trabalho utilizou-se uma via-férrea única com uma bitola de 1,668m, e com carris com o perfil 60E1, cujas propriedades modeladas estão explícitas na tabela 5.2:

Tabela 5.2 - Propriedades do carril com o perfil 60E1, segundo (EN 13674-1+A1, 2017)

Propriedade	Valor
Área da secção [cm ²]	76,7
Momento de inércia, eixo y-y [cm ⁴]	3038,3
Momento de inércia, eixo z-z [cm ⁴]	512,3
Coefficiente Poisson	0,3
Módulo de Young [MPa]	210
Massa Volúmica [kg/m ³]	7800

Como foi referido no capítulo 2, o sistema de fixação utilizado neste trabalho é o Vossloh W14 com palmilhas Zw700/148/165 e foi modelado como um conjunto mola-amortecedor, utilizando os valores que se apresentam na tabela 5.3 para as suas propriedades:

Tabela 5.3 - Propriedades do sistema de fixação modeladas (Vossloh, 2015)

Propriedade	Valor
Espessura [m]	0,01
Coefficiente de rigidez [MN/m]	130
Coefficiente de amortecimento [kNs/m]	15

As propriedades modeladas das travessas monoblocos são apresentadas na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Propriedades das travessas modeladas, segundo (IMV-019, 2000)

Propriedade	Valor
Comprimento [m]	2,6
Altura [m]	0,205
Espaçamento entre travessas [m]	0,6
Coefficiente Poisson	0,2
Massa Volúmica [kg/m ³]	2054
Módulo de Young [GPa]	38

Na tabela 5.5 apresentam-se os valores para o módulo de Young, o coeficiente de Poisson, a massa volúmica, o amortecimento beta de Rayleigh e a espessura das diferentes camadas do modelo. O amortecimento foi assumido na forma de Rayleigh, com coeficientes alfa e beta. O coeficiente alfa utilizado foi constante para todo o modelo com o valor de $\alpha_R=8.52 \text{ s}^{-1}$. Este coeficiente foi calibrado por Paixão, (2014).

Tabela 5.5 - Propriedades das camadas da via-férrea modeladas

Componentes	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson	Amortecimento de Rayleigh (s)	Massa Volúmica (kg/m ³)	Espessura (m)
Balastro	130	0,2	$4,0 \times 10^{-4}$	1530	0,3
Sub-balastro	200	0,3	$4,0 \times 10^{-4}$	1935	0,3
Camada de Coroamento	2820	0,3	$2,6 \times 10^{-3}$	1935	0,2
Fundação	80	0,3	$2,9 \times 10^{-3}$	2040	3

Na figura 5.3 estão ilustradas as diferentes dimensões transversais destas mesmas camadas:

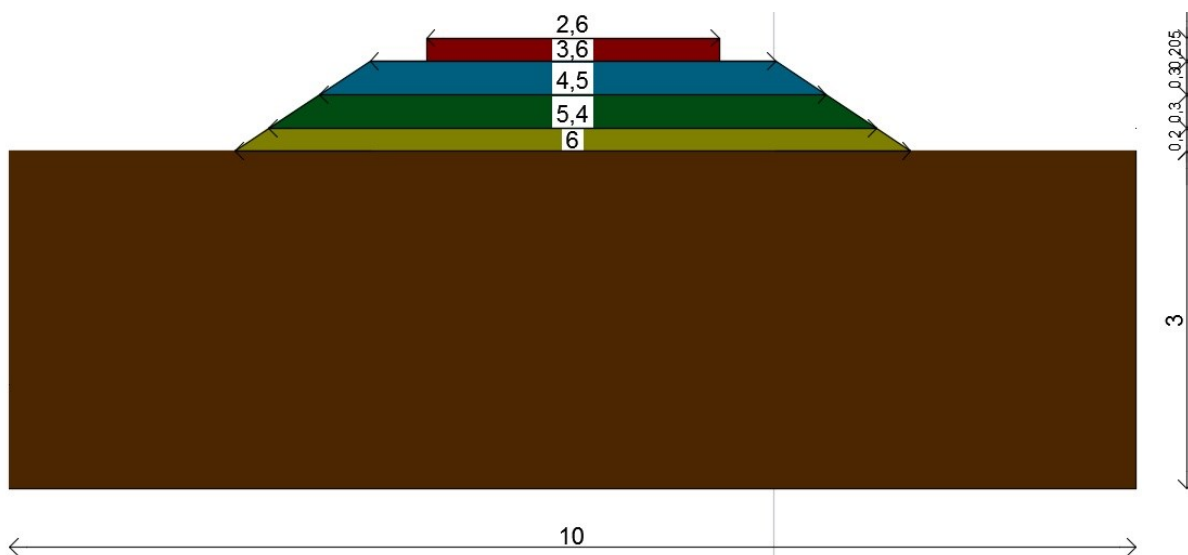


Figura 5.3 - Vista frontal do modelo com as dimensões transversais e espessuras das diferentes camadas modeladas (em metros)

Nas interfaces das camadas, o contato entre elas foi definido através da ligação direta dos nós da malha de elementos finitos.

O veículo representado na modelação foi o comboio Alfa Pendular, o comboio mais rápido que circula na rede ferroviária portuguesa. O aspeto geral deste veículo é visível na figura 5.4 a) e as suas dimensões longitudinais são apresentadas no esquema da figura 5.4 b), assim como as cargas por eixo. A tabela 5.6 apresenta algumas das características deste veículo.



a)



b)

Figura 5.4 – a) Aspeto geral do Alfa-Pendular; b) Representação esquemática das duas primeiras carruagens do mesmo veículo (CP, 2018)

Tabela 5.6 - Características do veículo (CP, 2018)

Característica	Valor
Número de carruagens	6
Comprimento total (m)	158,9
Velocidade de circulação (km/h)/(m/s)	220/61,1
Carga média por eixo/roda (kN)	132/66

Por motivos de simplicidade, a passagem do veículo sobre a via-férrea foi modelada apenas através da passagem do primeiro *bogie*. *Bogie* é a definição usada para caracterizar um conjunto de eixos de uma carruagem, correspondendo, no caso deste trabalho, aos dois primeiros eixos do comboio Alfa-Pendular (figura 5.5).



Figura 5.5 - *Bogie* do comboio Alfa-Pendular (CP, 2018)

O *bogie* foi modelado através de um conjunto de vigas de aço (figura 5.6), que têm a mesma massa que o *bogie* real. Foi também testada uma solução com uma placa de aço no lugar das vigas, tendo sido obtidos resultados praticamente indiferenciáveis da primeira solução, o que levou a que esta solução fosse descartada. As distâncias entre eixos do *bogie* e entre este e os carris são as equivalentes ao comboio Alfa-Pendular da figura 5.4 b).

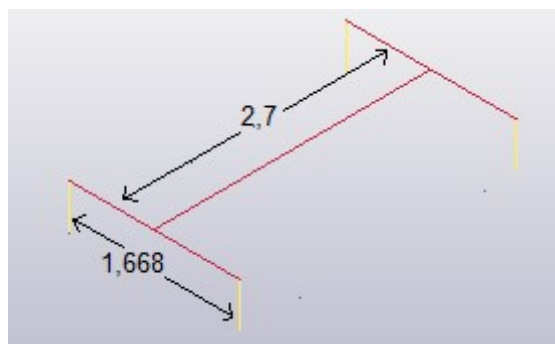


Figura 5.6 – Modelo do bogie utilizado no modelo tridimensional (dimensões em metros)

A degradação da camada de balastro foi reproduzida no modelo através da diminuição do módulo de Young original desta mesma camada. Estes valores são apresentados na tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Valores do módulo de Young inicial e do trecho degradado

Módulo de Young inicial da camada de balastro [MPa]	Módulo de Young do trecho de camada degradado (23.1% do módulo inicial) [MPa]
E=130	E=30

Para estudar a influência que terá a colocação da geogrelha nos deslocamentos verticais e horizontais da via-férrea, irão assim ser realizados quatro modelos:

- Um modelo de referência (M01), sem degradação da camada de balastro e, sem geogrelha (figura 5.7);

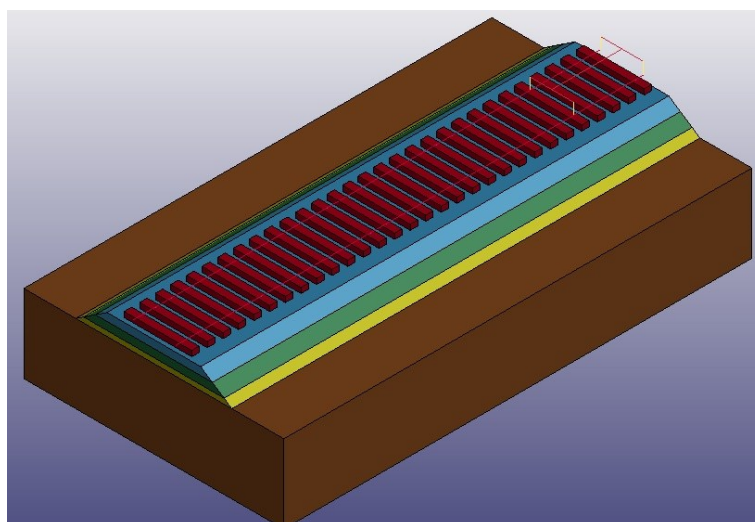


Figura 5.7 - Vista isométrica do modelo de referência, M01

- Um modelo (M02) sem degradação da camada de balastro, mas com inclusão da geogrelha dos 6 aos 12m na interface do balastro com o sub-balastro (figura 5.8):

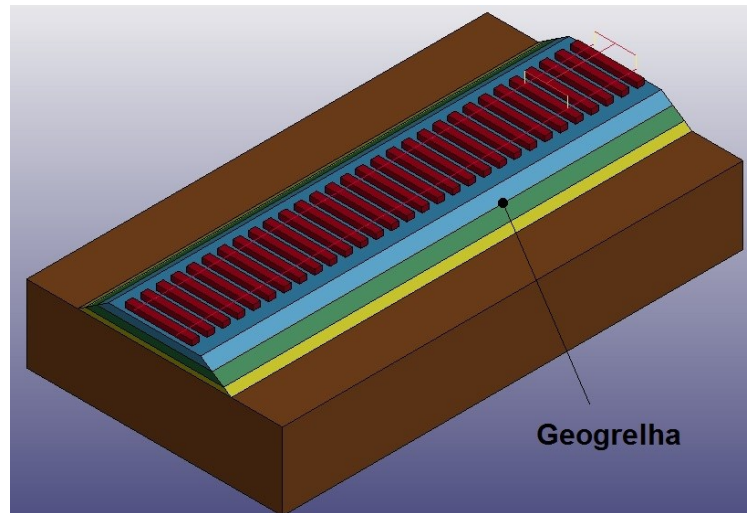


Figura 5.8 - Vista isométrica do modelo M02

- Um modelo (M03) com degradação da camada de balastro (dos 6m aos 12m) mas sem a inclusão da geogrelha (figura 5.9):

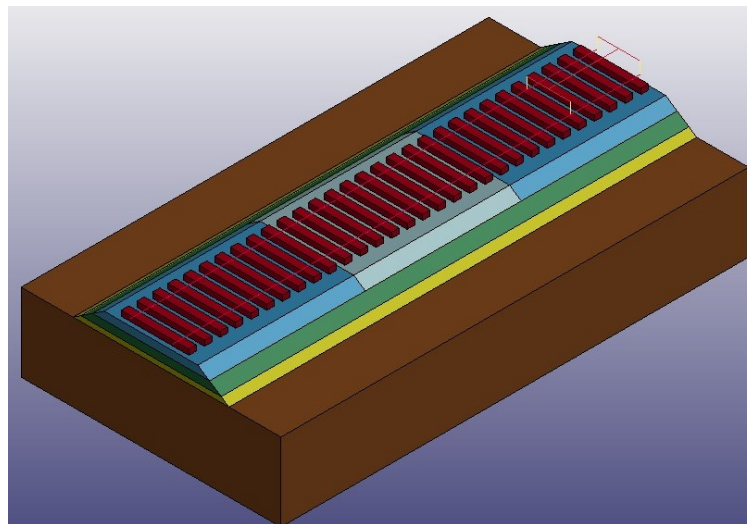


Figura 5.9 - Vista isométrica do modelo M03

- Um modelo (M04) com degradação da camada de balastro dos 6 aos 12m e a inclusão da geogrelha dos 6 aos 12m e na interface da camada de balastro com o sub-balastro (figura 5.10):

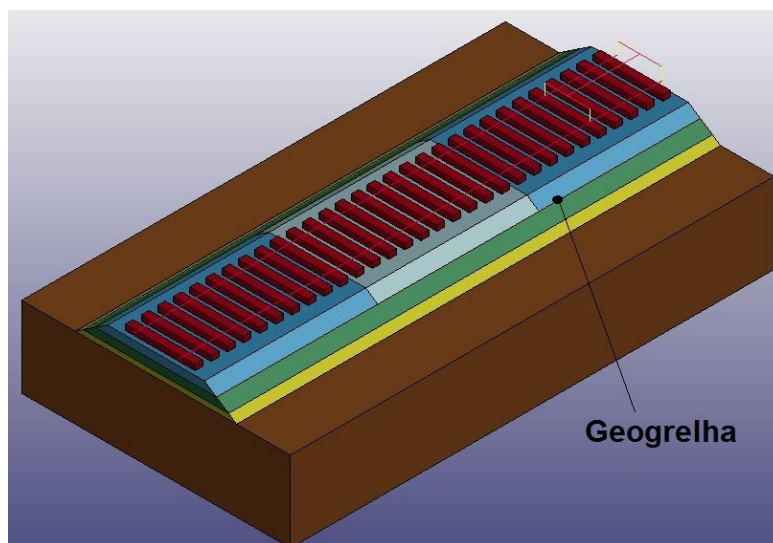


Figura 5.10 - Vista isométrica do modelo 4 (M04)

Na tabela 5.8 resume-se a composição dos diferentes modelos, em relação à presença, ou não, de degradação e da geogrelha.

Tabela 5.8 – Resumo da inclusão de degradação e da geogrelha nos diferentes modelos

Designação do modelo	Degradação	Comprimento longitudinal degradado	Geogrelha	Comprimento longitudinal reforçado com geogrelha
M01	Não	-	Não	-
M02	Não	-	Sim	De x=6m a x=12m
M03	Sim	De x=6m a x=12m	Não	-
M04	Sim	De x=6m a x=12m	Sim	De x=6m a x=12m

5.2.2. LS-DYNA e ANSYS

A vantagem da utilização de um *software* de elementos finitos para a criação de modelos é a de que esta formulação nos permite ter um controlo total sobre as características geométricas e mecânicas de todos os constituintes da via-férrea e dos veículos circulantes, e ao mesmo tempo, se assim for necessário, permitir a fácil alteração dos mesmos.

Por esses motivos, para este trabalho foi utilizada uma combinação dos *softwares* de elementos finitos ANSYS e LS-DYNA. Não foi utilizado apenas um dos *softwares* porque ambos têm vantagens e desvantagens, que estão listadas na tabela 5.9, fazendo da acoplação dos dois a solução mais prática.

Tabela 5.9 - Vantagens e desvantagens na utilização dos dois *softwares*

ANSYS		LS-DYNA	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Facilidade de criação do modelo tridimensional incluindo a malha de elementos finitos	Análise dinâmica explícita não faz parte da licença acadêmica disponibilizada pela FCT	Comandos *RAIL_TRAIN e *RAIL_TRACK	Dificuldade na criação do modelo tridimensional de forma paramétrica e automática
	Impossibilidade de introduzir objetos com inércia em movimento	Facilidade de introdução de objetos com inércia em movimento	

O LS-DYNA é um *software* que possui ferramentas de pré e pós-processamento, mas tendo em conta a dificuldade de criação e alteração da geometria e propriedades dos materiais modelados, torna-se pouco eficiente a sua utilização como ferramenta de pré-processamento.

Por este motivo, para a realização da fase do pré-processamento deste trabalho foi utilizado o ANSYS. Este *software* possui uma maior facilidade na criação e alteração do modelo devido à “ANSYS Parametric Design Language” (APDL), onde é possível parametrizar todas as dimensões dos materiais do modelo, incluindo a malha de MEF e as condições de fronteira. Também com recurso à APDL foram criados comandos adicionais que permitem traduzir toda a informação para a forma de comandos do LS-DYNA.

É então obtido através do ANSYS um ficheiro (.k) possível de ser lido no LS-DYNA e que permite que se faça uma análise à estrutura, e que os resultados possam ser extraídos posteriormente através da sua ferramenta de pós-processamento (Hallquist, 2006).

Resume-se na figura 5.11 o processo de criação do modelo tridimensional.

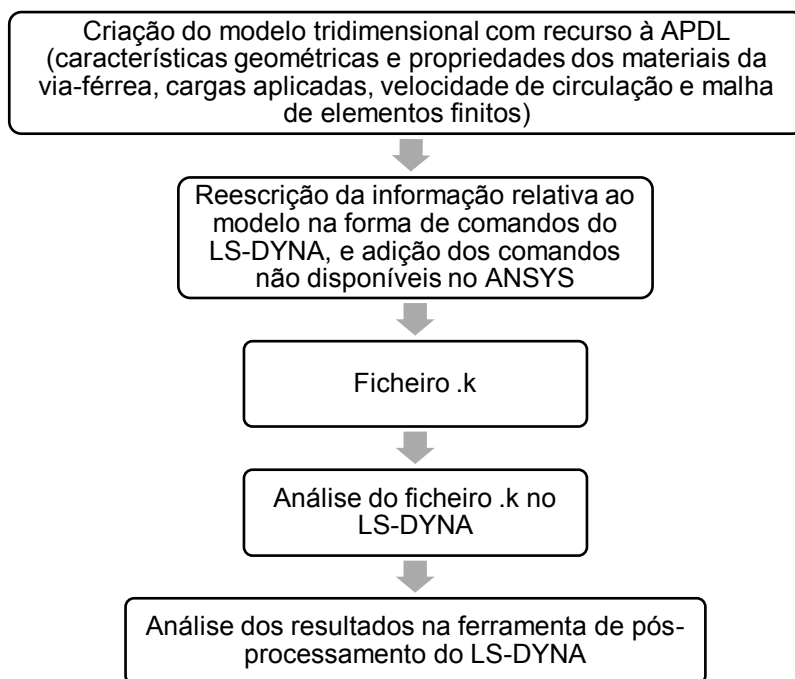


Figura 5.11 - Processo de criação do modelo tridimensional com recurso ao ANSYS (APDL) e LS-DYNA

5.2.3. Malha de elementos finitos

Todos os elementos da malha de elementos finitos são constituídos por elementos de 8 nós com 3 graus de liberdade por nó. Na tabela 5.12 apresentam-se as dimensões adotadas para os elementos da malha e, na figura 5.10 podemos observar o aspeto desta no modelo tridimensional. As dimensões longitudinais da malha foram depois adaptadas às dimensões das travessas utilizadas.

Tabela 5.10 - Dimensões dos elementos da malha de elementos finitos

Plano	Dimensões [cm]
Transversal	10
Longitudinal	15

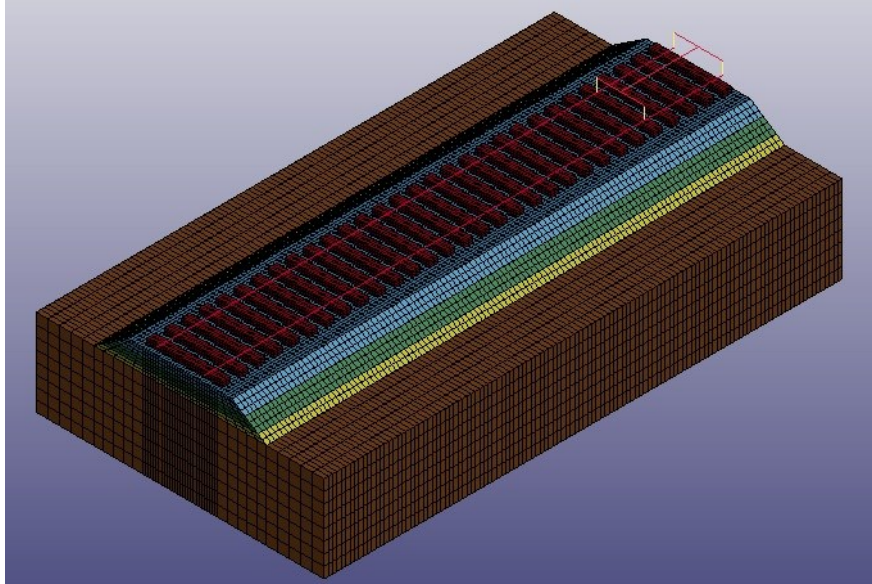


Figura 5.12 - Vista isométrica do modelo com a malha de elementos finitos

5.2.4. Propriedades do *bogie* modeladas

Como já referimos anteriormente, o veículo que se pretende representar neste trabalho é o primeiro *bogie* do comboio Alfa-Pendular.

Foram colocadas massas concentradas relativas a metade da massa do eixo para representar as rodas, em contacto com o carril, sendo este contacto modelado através de parâmetros pré-definidos de rigidez presentes no LS-DYNA (comandos *RAIL_TRACK e *RAIL_TRAIN, definidos no subcapítulo seguinte). As massas concentradas das rodas foram ligadas às vigas que constituem o *bogie* através da suspensão primária, como mostra o esquema da figura 5.13. Estas massas atuam apenas como massas, ou seja, a gravidade não foi incluída, porque se assim fosse estaria a ser aplicada uma força que não corresponderia à massa do comboio completo. Isto acontece porque o efeito da massa da carruagem é atenuado pela presença da suspensão secundária (Paixão, 2014).

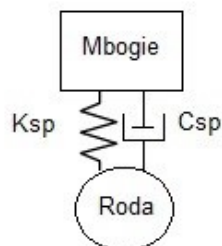


Figura 5.13 - Esquema da suspensão primária

Apesar de não se modelarem todas as componentes do veículo, as contribuições destas mesmas componentes não podem ser omitidas e, por isso, no local das rodas foi aplicada uma força correspondente ao peso de todas as partes que nelas se transmitem.

Os valores para os coeficientes de rigidez e amortecimento ilustrados na figura 5.13, são agora detalhados na tabela 5.11, bem como a massa do oscilador não suspensa:

Tabela 5.11 - Outras propriedades do veículo modeladas (FCT-UNL, IDMEC-IST, & REFER, 2008)

Componente	Valores utilizados
Massa oscilador não suspensa	850 kg/roda
Rigidez vertical da suspensão primária (K_{sp})	$22,4 \times 10^5$ N/m/roda
Amortecimento vertical da suspensão primária (C_{sp})	36×10^3 N/m/roda

5.2.5. *RAIL_TRACK e *RAIL_TRAIN

Como enunciado anteriormente na tabela 5.10, outra das vantagens da utilização do LS-DYNA prende-se com o fato de podermos utilizar os comandos pré-definidos *RAIL_TRACK e *RAIL_TRAIN para definir o contato roda-carril. Estes comandos simplificam bastante a criação do modelo, porque não é necessário definir os elementos ou superfícies de contato. O valor usual para a rigidez do contato roda-carril é de 2 MN/mm.

Nas vias-férreas existem irregularidades - pequenos desvios no alinhamento vertical dos carris - que afetam o contato roda carril, e que são uma das principais causas de vibrações. O algoritmo resultante da aplicação destes dois comandos oferece também a possibilidade de representar essas irregularidades, apesar de neste trabalho não se justificar a sua introdução. Para além disso, estes comandos foram também criados para assegurar que os nós do veículo seguem os elementos “viga” que representam o carril, e para transferir corretamente as forças entre eles (LS-DYNA Manual, 2015).

5.2.6. Condições de fronteira

Uma das maiores dificuldades apresentadas durante o estudo numérico da propagação de ondas elásticas em sólidos, quando se pretende utilizar o MEF, é a de simular um domínio infinito ou semi-infinito.

Esta é uma dificuldade que surge quando pretendemos analisar as vibrações em solos, pois embora possamos estar interessados apenas numa pequena região do solo, esta não está nem confinada a um espaço fechado nem isolada do restante solo. Portanto, se se optar por modelar o solo sem ter em conta as condições de fronteira, haverá uma reflexão das ondas elásticas nas fronteiras do modelo, o

que não representa a realidade, onde a energia é libertada. Estas reflexões ficarão sobrepostas à solução real do problema, tornando-a pouco fidedigna. Na aplicação das condições de fronteira é necessário ter em conta, não só o amortecimento para evitar estas reflexões, mas também rigidez para representar o resto do solo, ou seja, para que o solo não esteja “suspenso”.

Como forma de resolver este problema e garantir que o modelo está devidamente restringido, irão ser utilizadas as condições de fronteira viscoelásticas, já estudadas e validadas por Rodrigues, (2017).

Para utilizar este tipo de condições de fronteira, é necessário definir dois planos distintos, o plano inferior e os planos laterais – onde se incluem os planos paralelos e os normais à direção dos carris. Em relação às fronteiras inferiores, estas não devem representar um meio infinito porque as deformações elásticas significativas apenas ocorrem até à chamada “profundidade ativa” do solo, que é a profundidade à qual se encontra o estrato rígido. Não obstante, é útil trincar o modelo a uma profundidade menor, e portanto é necessário definir condições de fronteiras elásticas para este plano. Já as fronteiras laterais devem efetivamente simular um meio infinito, uma vez que não existe um “comprimento efetivo” do solo que possa ser definido, e portanto terão de ser consideradas condições de fronteiras diferentes das do plano inferior.

Fronteiras inferiores

Dada uma determinada profundidade h para a camada de fundação que queremos modelar, e assumindo que a profundidade efetiva desta camada é h_s , h_s-h é a profundidade total não representada no modelo. Como as propriedades da camada de fundação modelada são constantes, é possível definir as condições de fronteiras necessárias para simular a profundidade da camada que não está representada no modelo.

Como as fronteiras inferiores resultam de uma interseção do plano xy com a camada de fundação em $y=h_s-h$ (assumindo que o limite inferior do modelo completo se encontra em $y=0$), o plano resultante tem apenas três esforços que nele atuam, cujas direções são coincidentes com os três graus de liberdade de cada nó da representação em elementos finitos.

Assim, em termos de implementação destas fronteiras num modelo de elementos finitos, estas podem ser modeladas simplesmente como componentes discretos de rigidez – molas – adicionadas nos graus de liberdade das fronteiras, com a sua rigidez a ser determinada através das equações seguintes:

$$K_1 = A_{Node} \frac{E^{oed}}{h_s - h} \quad (1)$$

$$K_2 = A_{Node} \frac{G}{h_s - h} \quad (2)$$

$$K_3 = A_{Node} \frac{G}{h_s - h} \quad (3)$$

Onde,

O índice 1 corresponde à direção normal, e os índices 2 e 3 às direções tangenciais;

A_{Node} – Área de influência de cada nó, como demonstrado na figura 5.14;

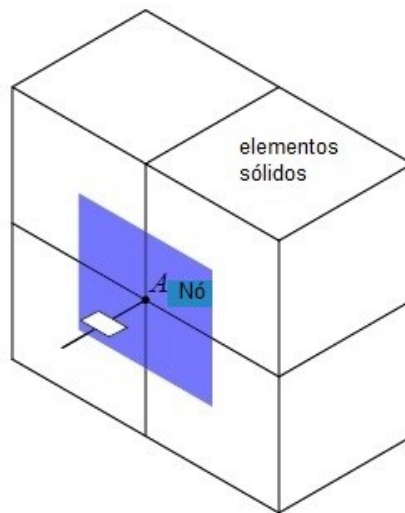


Figura 5.14 - Área de influência de cada nó (adaptado de (Rodrigues, 2017))

E^{oed} – Módulo oedométrico, calculado através de:

$$E^{oed} = \frac{(1 - \nu)E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (4)$$

G – Módulo de corte, calculado através de:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (5)$$

Estas fronteiras elásticas são suficientes para simular o solo em falta por baixo do modelo, no caso de se realizarem análises estáticas ou modais.

Fronteiras laterais

Como já referimos anteriormente, as condições de fronteira lineares elásticas utilizadas para as fronteiras inferiores não resultam para as fronteiras laterais, já que o meio que queremos representar não tem um comprimento finito.

Assim, irão ser utilizadas condições de fronteira viscoelásticas para ondas tridimensionais. Este modelo, desenvolvido por Jingbo et al., (2006) considera que estas se propagam de uma for esférica dentro de um meio elástico. Os coeficientes de rigidez e amortecimento assumem uma fronteira esférica, e por isso têm uma direção radial e duas direções circunferenciais.

Ambas as direções circunferenciais são perpendiculares à normal e entre si, e têm necessariamente as mesmas condições de fronteira. Esta formulação é traduzida diretamente para os planos de fronteira no modelo de elementos finitos, não havendo distinção entre as duas direções perpendiculares à normal.

Na tabela 5.12 apresenta-se a formulação necessária para a implementação em elementos finitos, dos componentes viscoelásticos absorventes num meio tridimensional, nomeadamente dos coeficientes de rigidez e amortecimento:

Tabela 5.12 - Coeficientes de rigidez e amortecimento para implementação de fronteiras viscoelásticas absorventes num modelo de elementos finitos, nas diferentes direções

Direção	k_i	c_i
Radial	$4G/r_1$	ρc_p
Circunferencial	$2G/r_1$	ρc_s

Onde:

r_1 – Distância da fronteira ao ponto de aplicação da carga;

ρ – Massa volúmica;

c_p – Velocidade de propagação das ondas de pressão, calculada através de:

$$c_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}} \quad (6)$$

c_s – Velocidade de propagação das ondas de corte, calculada através de:

$$c_p = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (7)$$

(Jingbo et al., 2006) testaram estas fronteiras viscoelásticas para quatro aplicações de carga diferentes e mostraram que estas são mais efetivas que outros tipos de fronteiras tradicionalmente utilizadas.

Foram criados comandos, com recurso à APDL, que permitem fazer o cálculo automático destas condições de fronteira e, posteriormente, adicioná-las aos graus de liberdade de cada nó (nos planos laterais e no plano inferior). Na figura 5.15 é possível observar o aspeto que estas condições de fronteira têm no modelo tridimensional:

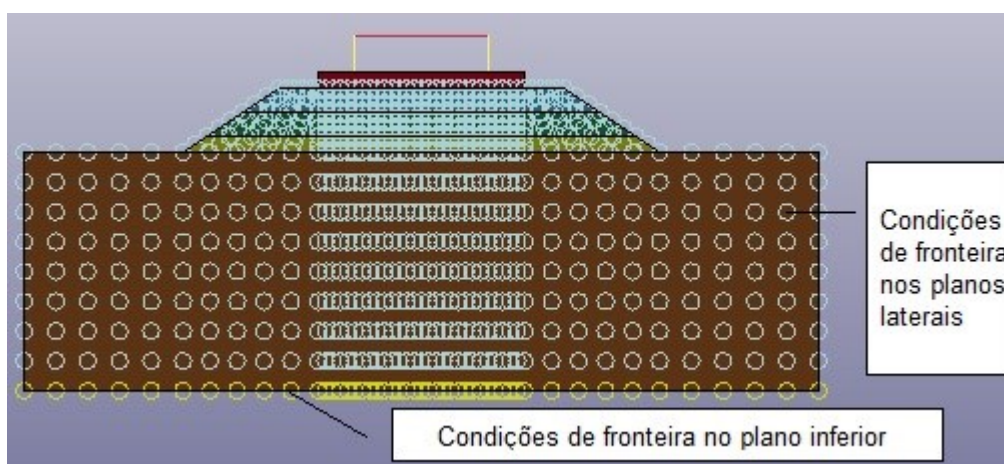


Figura 5.15 - Vista frontal do modelo com a indicação das condições de fronteira nos diferentes planos

5.2.7. Simplificações e limitações na criação do modelo

A realização deste modelo tridimensional de elementos finitos assumiu algumas simplificações, nomeadamente:

- Como se pretende estudar o comportamento da via-férrea em termos de deslocamentos dos carris a curto prazo, provocados pela passagem do primeiro *bogie* do veículo, adotou-se a simplificação de que os materiais que constituem as diferentes camadas da via serão modelados como tendo um comportamento elástico-linear;
- As dimensões do modelo. É de esperar que um modelo de maiores dimensões consiga ser mais exato na análise da resposta da estrutura, porque é necessário que exista uma distância suficiente para que a resposta se torne estacionária, antes de entrar na zona degradada.

Existiram também algumas limitações na criação do modelo, tais como:

- Como foi anteriormente explicado, o MEF permite apenas modelar as camadas granulares (balastro, sub-balastro, coroamento e fundação) como camadas contínuas homogêneas, tornando bastante difícil representar a sua natureza discreta. Esta condicionante leva a que o mecanismo do imbricamento seja difícil de reproduzir, e portanto nesta abordagem é assumido que este mecanismo está perfeitamente ativo;
- Nas fichas técnicas fornecidas pelos fabricantes das geogrelhas, a rigidez no plano é definida através do valor efetivo por um módulo de rigidez secante, obtido através de um gráfico que relaciona carga por unidade de comprimento com a deformação, como representado na figura 3.17. Para conseguirmos obter o valor do módulo de Young, em unidades de tensão (necessário para a modelação em elementos finitos), o módulo de rigidez secante deve ser dividido por uma espessura efetiva da geogrelha. Como será explicado no ponto seguinte, esta espessura efetiva é de difícil determinação, e uma ligeira variação desta dimensão pode levar a alterações drásticas no módulo de Young do material. No entanto, foram feitas simulações utilizando duas espessuras distintas para a geogrelha: 1 cm e 0,5 cm, não tendo sido observadas diferenças consideráveis;
- A geogrelha também foi modelada como uma camada contínua e isotrópica, e portanto sem aberturas. Isto faz com que tenhamos que definir uma espessura efetiva para a geogrelha, necessária para assegurar que o comportamento real da geogrelha seja semelhante ao comportamento da camada de elementos finitos. Para este trabalho utilizou-se uma espessura de 0,5 cm. Poderiam ter sido efetuados estudos através da teoria da homogeneização para determinar uma espessura que melhor assegurasse o comportamento da geogrelha, mas tal está fora do âmbito deste trabalho;
- Quando aplicamos uma pressão uniforme em materiais definidos por camadas restringidas lateralmente (figura 5.16), as tensões horizontais podem ser facilmente calculadas analiticamente e, assim, é possível observar que dependem do coeficiente de Poisson e não do módulo de Young, como também podemos verificar pela equação 8. Isto indica que o coeficiente de Poisson das geogrelhas corresponde a um dado importante para a modelação numérica, mas não é fornecido pelos fabricantes. Por este motivo foi adotado o coeficiente de Poisson utilizado por Tafuri, (2009);

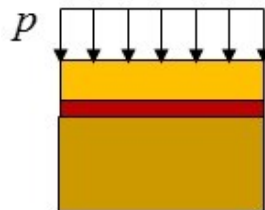


Figura 5.16 - Esquema da aplicação de uma pressão uniforme sobre camadas restringidas

$$\sigma_{h,j} = -\frac{\nu_j p}{1 - \nu_j} \quad (8)$$

Onde,

$\sigma_{h,j}$ – Tensões Horizontais;

ν_j - Coeficiente de Poisson;

p – Pressão uniforme aplicada

- Como já foi referido anteriormente, outra das limitações na conceção do modelo é o fato de se assumir que as interfaces das diferentes camadas se interligam perfeitamente, já que no modelo numérico, todos os nós estão conectados. Este comportamento não representa o comportamento de camadas granulares na realidade, onde estas se misturam de uma forma perfeitamente aleatória.

5.2.8. Trabalhos prévios de validação dos modelos tridimensionais

Numa primeira fase deste trabalho de modelação averiguou-se se o modelo desenvolvido produzia resultados idênticos a modelos já concebidos anteriormente. Este procedimento é bastante importante, porque como já vimos anteriormente, ao longo da modelação tridimensional existe a necessidade de fazer várias simplificações e suposições na representação das características geométricas e propriedades - da via e dos materiais que a constituem e que nela circulam-, e também porque é necessário garantir que o *software* utilizado consegue obter resultados adequados.

Para a validação do modelo numérico realizado neste estudo, utilizou-se como referência o trabalho de (Paixão, 2014), em que este estudou várias zonas de transição de um troço de uma via-férrea em Alcácer do Sal. Tendo como base as propriedades da via e do veículo apresentadas ao longo deste capítulo, os resultados relativos ao deslocamento do carril medido na 12ª travessa ($x=6,9m$), após a passagem do primeiro *bogie*, foram comparados com os resultados obtidos por Paixão, (2014) e são agora apresentados na figura 5.17:

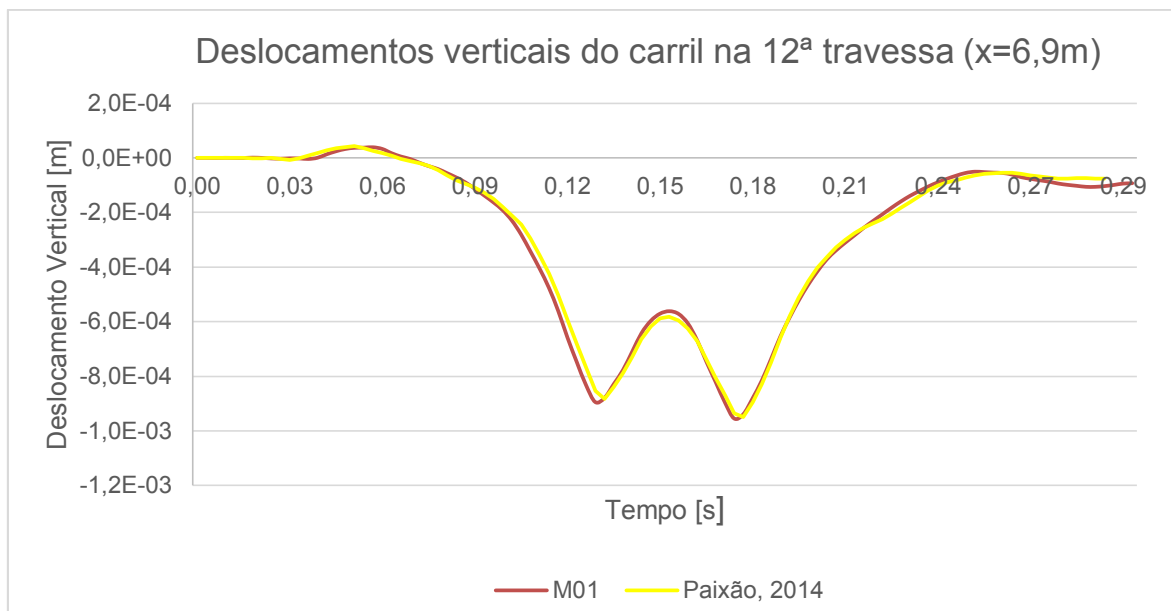


Figura 5.17 – Comparação do deslocamento do carril na 12ª travessa

Como é possível observar, foi obtida uma boa concordância entre o modelo de elementos finitos usado nesta dissertação com recurso ao LS-DYNA (nomeadamente o modelo de referência, M01), e os resultados obtidos por Paixão, (2014).

Assim sendo confirma-se a adequabilidade do modelo na representação dos efeitos da passagem do veículo na via-férrea e que este modelo pode ser usado como referência para os casos de estudo apresentados em 5.2.1.

5.3. Propriedades da geogrelha modeladas

A geogrelha, esta foi modelada através de elementos de “casca” fina, e colocada diretamente na interface entre a camada de balastro e sub-balastro, sobrepondo-a aos restantes elementos sólidos presentes. A colocação da geogrelha nesta interface deve-se ao fato de, como vimos no capítulo 4, o estudo realizado por Yap et al., (2017) ter definido esta zona como a mais adequada para o efeito. Na tabela 5.13 apresentam-se os valores fornecidos pelos fabricantes para as diferentes propriedades da geogrelha.

Tabela 5.13 - Características da geogrelha fornecidas pelos fabricantes (ETA 12-0530, 2012)

Parâmetro	Valor
Rigidez radial a 0,5% de extensão (kN/m)	540
Eficácia das junções (%)	100
Aberturas (mm)	55x55x55
Massa por unidade de área (g/m ²)	300

Mas nem todas estas características do material podem ser incluídas no modelo de elementos finitos, devido às limitações enunciadas no subcapítulo 5.2.7. Assim, as características da geogrelha incluídas no modelo tridimensional são apresentadas na tabela 5.14:

Tabela 5.14 - Características da geogrelha modeladas

Propriedade	Valor
Espessura (m)	0,005
Módulo de Young (MPa)	108
Coefficiente de Poisson (Tafari, 2009)	0,3

5.4. Análise dos resultados

5.4.1. Deslocamentos verticais do carril

Os deslocamentos verticais dos carris foram analisados, para os quatro modelos, num nó do carril que fica sobre a 18ª travessa, nó esse que corresponde a uma coordenada $x=10,5\text{m}$, e que é visível a amarelo na figura 5.18:

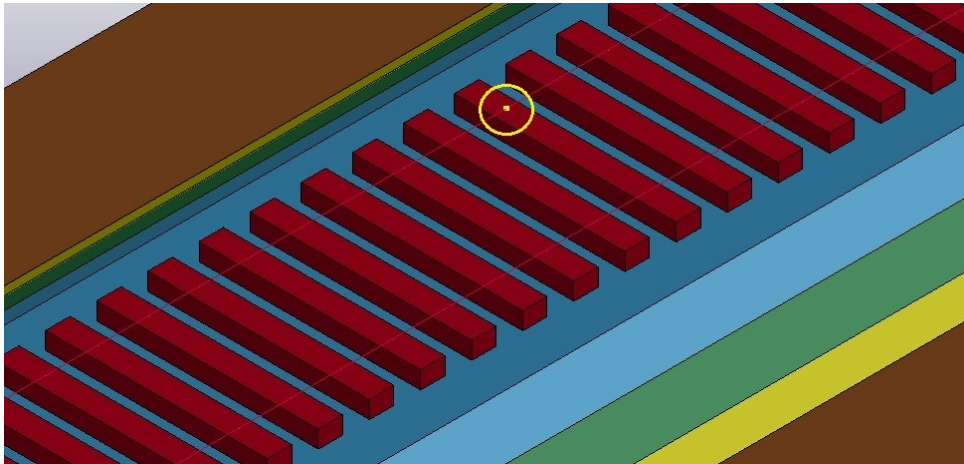


Figura 5.18 - Ilustração do nó 99137 do modelo tridimensional

Este foi o nó selecionado para a análise dos deslocamentos do carril por, no caso dos modelos que incluem degradação, este se encontrar dentro dos limites da zona degradada (6 a 12m).

Na figura 5.19, apresentam-se os deslocamentos verticais do carril para os modelos M01 e M02:

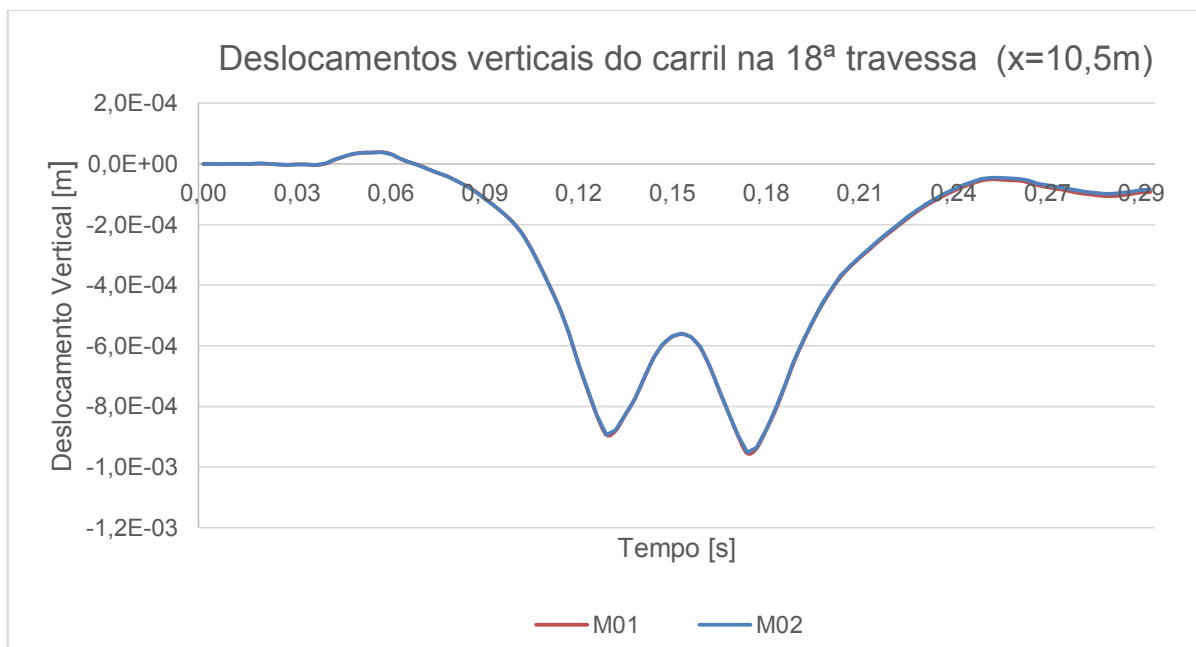


Figura 5.19 - Deslocamentos verticais do carril nos modelos M01 e M02

Como é possível observar, os deslocamentos verticais dos carris para o modelo M01 e M02, estão sobrepostos um ao outro. O mesmo acontece quando analisamos os mesmos deslocamentos, mas nos modelos M03 e M04 (figura 5.20):

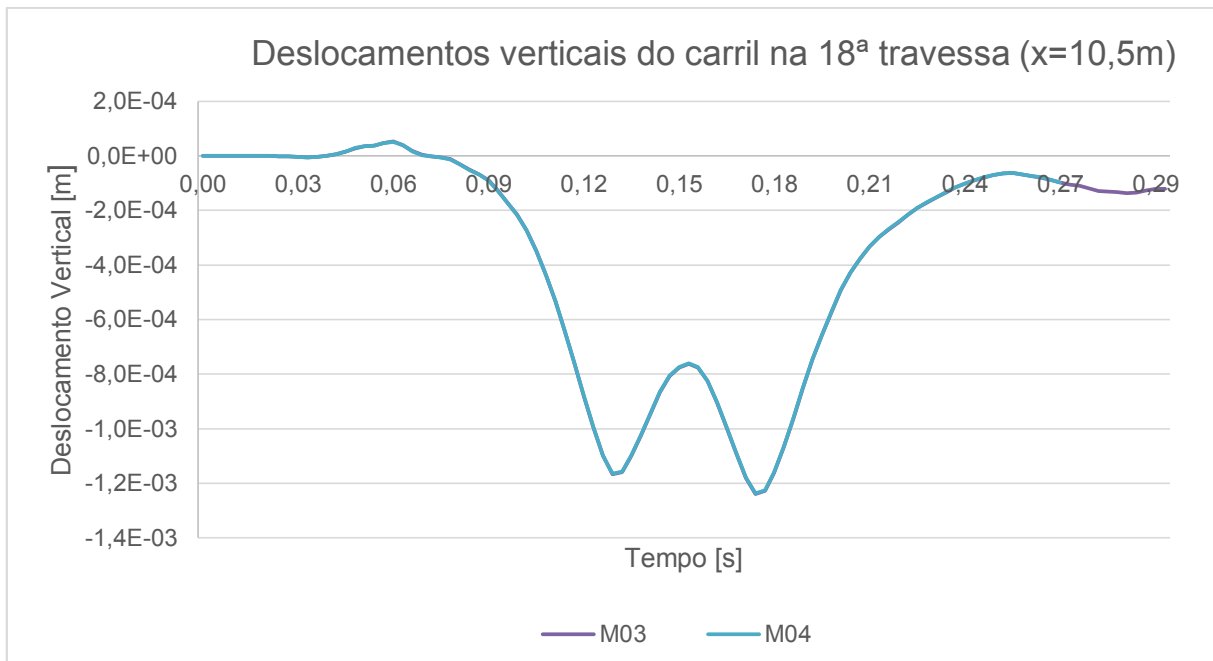


Figura 5.20 - Deslocamentos verticais do carril (M03 e M04)

Estes resultados sugerem que a presença da geogrelha não produziu diferenças nos deslocamentos verticais do carril. Uma das razões possíveis para que isto aconteça, pode ser a de que os deslocamentos verticais não são suficientemente grandes para introduzir os efeitos de membrana tensionada na geogrelha.

5.4.2. Deslocamentos horizontais do carril

Em relação aos deslocamentos horizontais, estes foram analisados no mesmo nó ilustrado na figura 5.18. Como é visível na figura 5.21, a situação para estes deslocamentos é um pouco diferente, já que para os modelos M01 e M02, alguns benefícios da presença da geogrelha podem já ser observados:

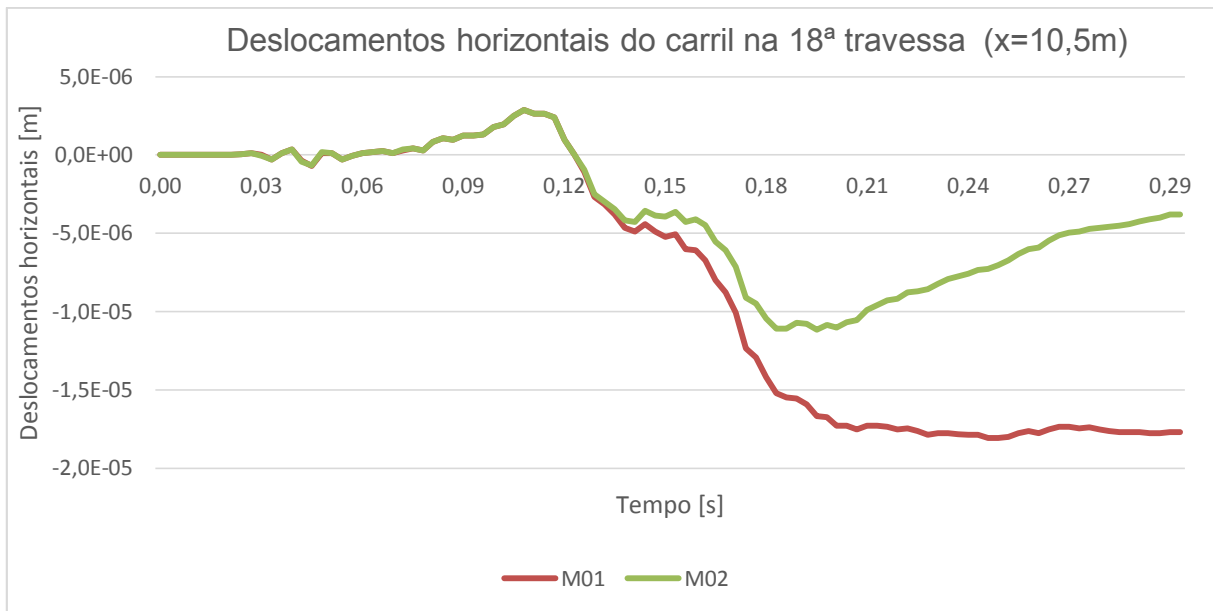


Figura 5.21 - Deslocamentos horizontais do carril (M01 e M02)

O mesmo acontece quando são comparados os modelos M03 e M04 (figura 5.22):

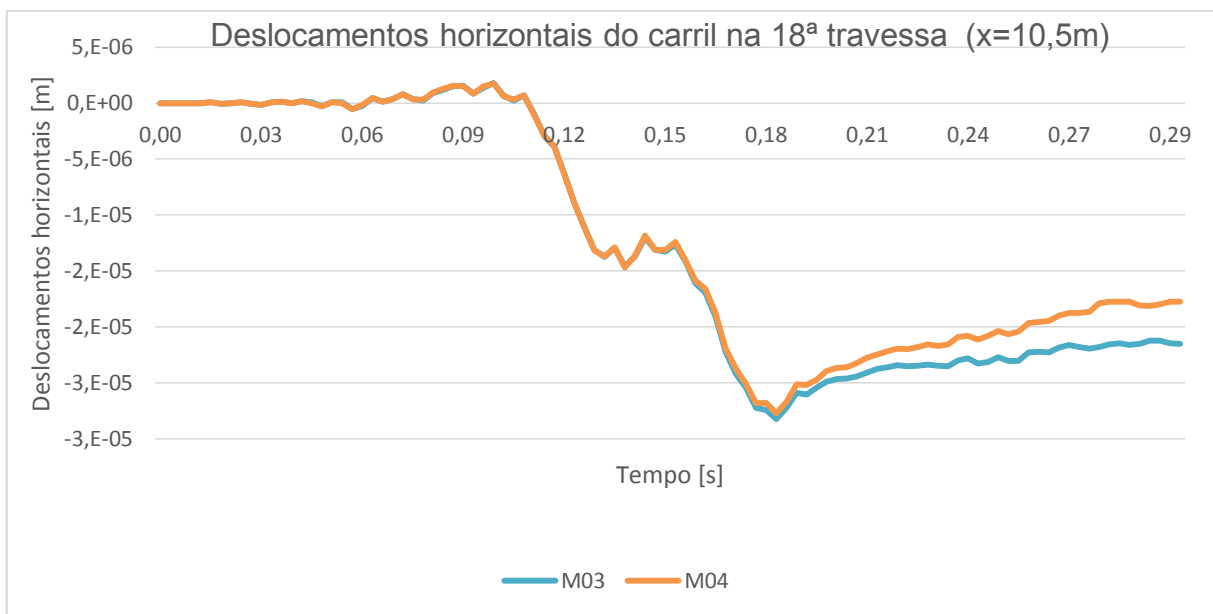


Figura 5.22 - Deslocamento horizontal do carril (M03 e M04)

No entanto, os benefícios da presença da geogrelha são mais visíveis quando esta foi introduzida no modelo sem degradação. De salientar que os efeitos positivos começam a ser mais evidentes após a passagem do segundo eixo do *bogie*.

5.4.3. Deslocamentos horizontais da camada de balastro

Foram ainda analisados os deslocamentos horizontais num dos nós da camada de balastro, representado na figura 5.23:

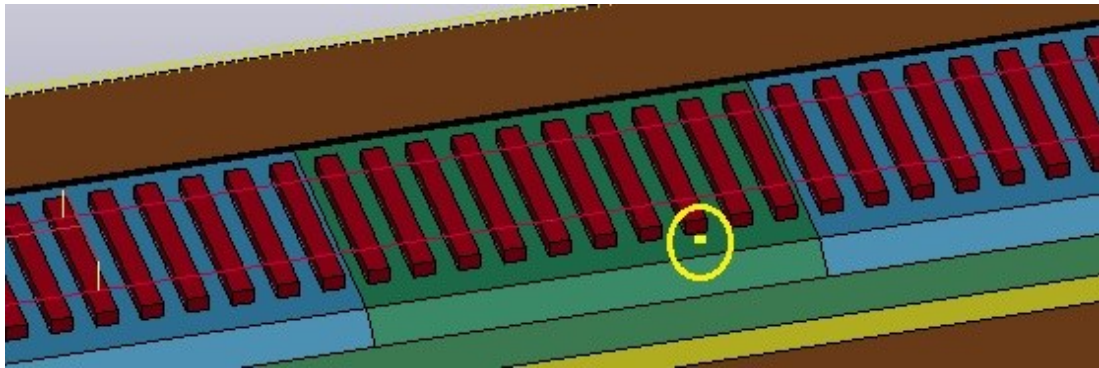


Figura 5.23 - Ilustração do nó 62461 do modelo tridimensional

Também neste caso, os efeitos da introdução da geogrelha foram visíveis. Como está demonstrado nas figuras 5.24 e 5.25, a introdução deste material contribuiu para uma diminuição dos deslocamentos horizontais da camada de balastro.

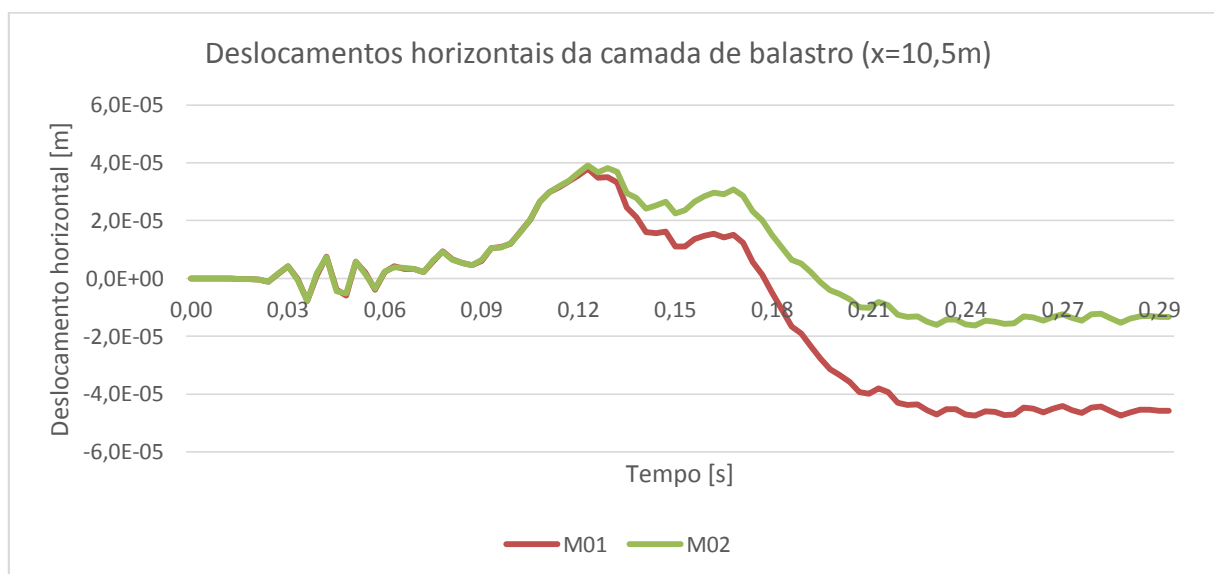


Figura 5.24 - Deslocamento horizontal do balastro (M01 e M02)

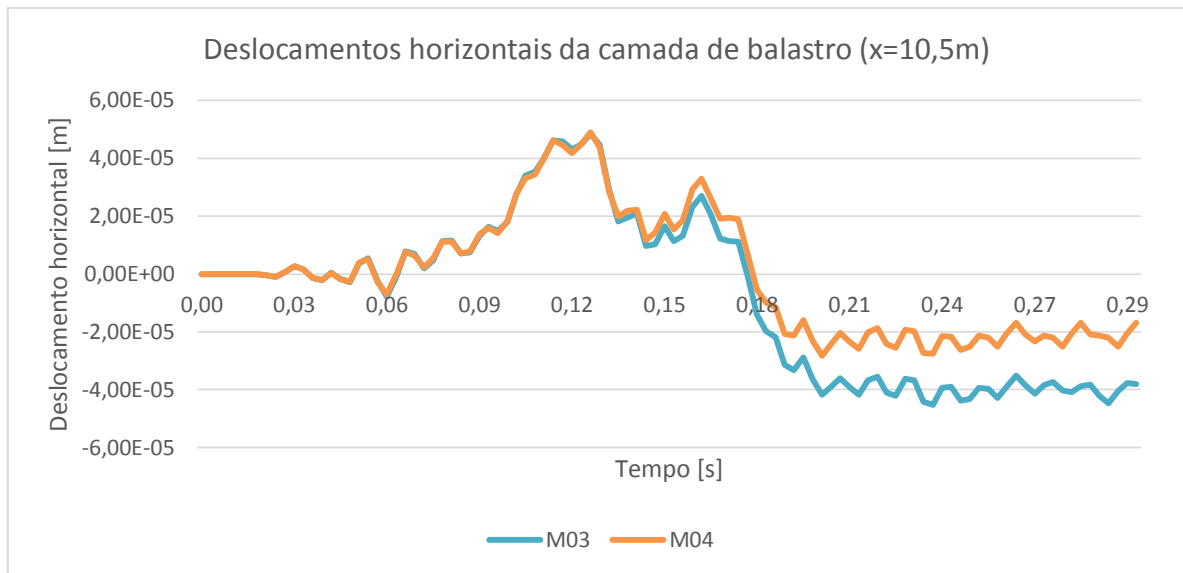


Figura 5.25 - Deslocamento horizontal do balastro (M03 e M04)

Como foi referido anteriormente na tabela 3.2, a ativação dos mecanismos do imbricamento e confinamento, é um dos requisitos para que as geogrelhas possam desempenhar a função de estabilização da via-férrea. É portanto expectável que uma correta representação deste mecanismo no modelo consiga demonstrar de uma forma mais precisa os contributos da geogrelha para a diminuição dos deslocamentos laterais do balastro.

5.5. Resumo do capítulo

Neste capítulo começou por ser abordado o caso de estudo e detalhadas as suas características, bem como a influência destas características no tempo de computação do modelo. Explicou-se também, de que forma a degradação da camada de balastro foi incluída no modelo.

Foram analisadas as vantagens e desvantagens dos *softwares* ANSYS e LS-DYNA, e como foi realizada a acoplação dos dois para a realização do trabalho e também a dimensão e tipo dos elementos da malha de elementos finitos;

Detalharam-se as características do *bogie* modelado, e a forma como este está conectado à via-férrea através da suspensão primária. A importância dos comandos *RAIL_TRAIN e *RAIL_TRACK na modelação do contato roda-carril foi também abordada.

Explicou-se a importância das condições de fronteira para uma correta representação da situação real, fazendo a diferenciação na aplicação destas nos planos laterais e inferior.

Foram descritas as simplificações e as limitações na criação do modelo, e como estas podem afetar os resultados obtidos. Posteriormente, os resultados obtidos com o modelo de elementos finitos foram

comparados com o trabalho de Paixão, (2014), para se confirmar a adequabilidade do modelo realizado;

Por último, foram efetuadas análises de resultados aos deslocamentos verticais e horizontais dos carris, e também aos deslocamentos horizontais do balastro. Desta análise, conclui-se que a presença da geogrelha não influenciou os deslocamentos verticais dos carris, mas contribuiu para uma estabilização da via representada por uma diminuição dos deslocamentos horizontais (do carril e do balastro).

6. Considerações finais

6.1. Conclusões

A presente dissertação estudou, através de modelos numéricos, de que maneira a inclusão de geogrelhas em vias-férreas parcialmente degradadas ao nível da camada de balastro, contribui para o reforço/estabilização das mesmas.

Com esse propósito e, através de uma combinação dos *softwares* de elementos finitos ANSYS e LS-DYNA, foi criado um modelo tridimensional que representasse uma via-férrea tipicamente utilizada em Portugal e, também, um veículo que normalmente circulasse na mesma.

A via representada como modelo de referência, tem 18m de comprimento por 10m de largura e, inclui: quatro camadas granulares, homogéneas e isotrópicas (uma camada de balastro, uma camada de sub-balastro, uma camada de coroamento e uma camada de fundação), modeladas através de elementos sólidos; as travessas, igualmente modeladas como elementos sólidos; os carris, modelados como elementos de viga; o sistema de fixação, modelado como um elemento mola-amortecedor. A degradação da camada de balastro foi posteriormente adicionada ao modelo de referência e, foi representada através de uma diminuição no módulo de Young original da mesma, num troço intermédio da via com 6m de comprimento.

Para não existirem reflexões das ondas elásticas nas fronteiras do modelo, foram adicionadas condições de fronteiras absorventes, ao plano inferior e aos planos laterais do mesmo. Estas condições de fronteira, com diferentes formulações nos vários planos, foram adicionadas a cada nó da malha de elementos finitos.

O veículo representado foi o Alfa-Pendular, que circula em Portugal. Por motivos de simplicidade e, por se considerar suficiente para a análise em causa, apenas foi modelado o primeiro *bogie* deste veículo. Este *bogie* foi criado através de um conjunto de vigas de aço com a mesma massa do *bogie* real, ligadas a um outro conjunto de massas concentradas (que representam as rodas do veículo), através de um sistema de suspensão primária. Estas massas concentradas foram depois colocadas em contato com o carril, com este contato a ser modelado através dos comandos *RAIL_TRAIN e *RAIL_TRACK do LS-DYNA.

A geogrelha, modelada como um elemento de casca, foi também ela representada como sendo uma camada homogénea, isotrópica e sem aberturas, o que criou algumas limitações no modelo, nomeadamente na definição da espessura deste material e, também, na representação dos seus mecanismos de funcionamento. As propriedades modeladas da geogrelha foram adaptadas a partir de dados fornecidos pelos fabricantes.

Devido a estas limitações no modelo, foi necessário proceder a uma validação do mesmo. Esta validação foi feita através da comparação dos deslocamentos verticais dos carris, obtidos com o modelo tridimensional de referência (M01), com os resultados para os mesmos deslocamentos obtidos por Paixão, (2014). Tendo sido obtidos resultados concordantes entre os dois modelos, confirmou-se a adequabilidade do modelo de elementos finitos criado para esta dissertação e procedeu-se à análise do caso de estudo.

Desta análise de resultados e, de acordo com os objetivos enumerados no início deste trabalho, foi possível concluir que a inclusão da geogrelha, tanto nos modelos sem degradação, como nos modelos com degradação, não introduziu diferenças nos deslocamentos verticais dos carris. Por outro lado, quando foram analisados os deslocamentos horizontais dos carris, foi possível observar uma diminuição destes, nos modelos onde a geogrelha foi introduzida. Foi igualmente observada uma diminuição dos deslocamentos horizontais da camada de balastro.

Tendo isto em conta, e apesar das limitações na criação do modelo tridimensional, este estudo demonstrou que, a inclusão da geogrelha contribuiu de uma forma positiva para a estabilização horizontal da via-férrea, através da diminuição dos deslocamentos horizontais dos carris e da camada de balastro.

6.2. Desenvolvimentos Futuros

Algumas recomendações para futuros estudos numéricos que pretendam analisar a influência das geogrelhas no reforço e estabilização de vias-férreas, utilizando modelação numérica, incluem:

- A modelação da geogrelha não como uma camada contínua, mas como uma camada onde as aberturas e as respetivas dimensões consigam ser representadas, para uma correta definição da espessura efetiva da geogrelha;
- A representação dos mecanismos de imbricamento e confinamento, através da introdução de mecanismos de fricção entre as camadas subjacentes;
- Implementar nos diferentes materiais que compõem a via-férrea um comportamento não linear, com o objetivo de analisar o comportamento a longo prazo da via-férrea através de passagens sequenciais do veículo.
- A realização de modelos numéricos de elementos discretos para estudar se, uma representação mais real (tanto das camadas granulares como da geogrelha) resulta numa melhor definição na interação geogrelha-balastro e, conseqüentemente, nos mecanismos do imbricamento e confinamento, e assim, se conseguir reproduzir melhores resultados na análise dos deslocamentos de uma via-férrea parcialmente degradada.

Bibliografia

- Azevedo, Á. F. M. (2003). *Método dos elementos finitos* (1.ª ed.). Porto: FEUP.
- Barreto, J. (2016). *Modelação da interação lateral balastro-travessa em vias-férreas*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Carneiro, J. (2009). *Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental - a importância da incorporação de aditivos químicos*. Dissertação de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- CP. (2018). CP - Comboios de Portugal. Obtido 13 de Setembro de 2018, de <https://www.cp.pt/passageiros/pt/>
- Dahlberg, T. (2004). *Railway track settlements - a literature review* (p. 41). Suécia: Linkoping University.
- Das, B. M. (2016). Use of geogrid in the construction of railroads. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s41062-016-0017-8>
- EN 13674-1+A1. (2017). EN 13674-1+A1. Obtido 26 de Janeiro de 2018, de <https://www.en-standard.eu/csn-en-13674-1-a1-railway-applications-track-rail-part-1-vignole-railway-rails-46-kg-m-and-above/>
- EOTA TR041: 2012 - Non-reinforcing hexagonal geogrid for the stabilization of unbound granular layers by way of interlock with the aggregate - Technical Report. (2012).
- ERA. (2018). *Report on Railway Safety and Interoperability in the EU - 2018* (p. 132). Luxembourg: European Union Agency for Railways.
- Esveld, C. (2001). *Modern Railway Track* (2ª). MRT-Productions.
- ETA 12-0530. (2012). ETA 12-0530 TriAx TX100 series. European Technical Approval, Tensar Manufacturing Ltd.
- European Court of Auditors. (2016). *O transporte ferroviário de mercadorias na UE ainda não está no rumo certo. Relatório especial no. 08, 2016. Relatório especial no. 08, 2016*. Luxembourg: Publications Office.
- FCT-UNL, IDMEC-IST, & REFER. (2008). *Base de dados de vias ferroviárias - Projeto Smartrack*.
- Fontul, S. (2016). Slides de apoio às aulas da disciplina de Infraestruturas Ferroviárias e Portuárias. Faculdade de Ciências e Tecnologias - UNL.
- Fortunato, E. (2005). *Renovação de plataformas ferroviárias. Estudos relativos à capacidade de carga*. Dissertação de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Funções dos geossintéticos.pdf. (sem data).

Gardien, W., & Stuit, H. G. (2003). Modelling of soil vibrations from railway tunnels. *Journal of Sound and Vibration*, 267(3), 605–619.

Hallquist, J. O. (2006). *LS-DYNA Theory Manual*.

IGS - Portugal. (2017a). Aplicações de geossintéticos em vias-férreas. Obtido de <http://www.spgeotecnia.pt/upload/docs/Documentos%20IGS/FOLHETOS/Geossinteticos%20em%20Vias%20Ferreas.pdf>

IGS - Portugal. (2017b). Funções dos Geossintéticos. Obtido de <http://www.spgeotecnia.pt/upload/docs/Documentos%20IGS/FOLHETOS/Funcoes%20dos%20Geossint%C3%A9ticos.pdf>

IGS - Portugal. (2017c, a). Obtido de <http://www.spgeotecnia.pt/upload/docs/Documentos%20IGS/FOLHETOS/Classificacao%20dos%20Geossinteticos.pdf>

IMV-019. (2000). IMV-019 - Fabrico e fornecimento de travessas monobloco para os carris UIC54 e 60.

Indraratna, B., Ngo, N. T., Sun, Q., Rujikiatkamjorn, C., & Ferreira, F. B. (2018). Concepts and Methodologies for Track Improvement and Associated Physical Modelling and Field Monitoring (p. 13). Apresentado na ISGTI.

Indraratna, B., & Nimbalkar, S. (2013). Stress-Strain Degradation Response of Railway Ballast Stabilized with Geosynthetics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(5), 684–700. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000758](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000758)

IP. (2016). Léxico | Infraestruturas de Portugal. Obtido 8 de Fevereiro de 2018, de <http://www.infraestruturasdeportugal.pt/negocios-e-servicos/lexico/b>

ISO 9863-1. (2016). ISO 9863-1:2016 - Geosynthetics - Determination of thickness at specified pressures - Part 1: Single layers. Obtido 16 de Janeiro de 2018, de <https://www.iso.org/standard/59641.html>

ISO 10318-1. (2005). Geosynthetics - Part 1: Terms and definitions.

ISO 10319. (2008). ISO 10319:2008 - Geosynthetics - Wide-width tensile test. Obtido 16 de Janeiro de 2018, de <https://www.iso.org/standard/36523.html>

IT.GEO.006. (2007). Caraterísticas técnicas do sub-balastro. Rede Ferroviária Nacional.

- Jingbo, L., Yixin, D., Xiuli, D., Zhenyu, W., & Jun, W. (2006). 3D viscous-spring artificial boundary in time domain. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 5(1), 1–9.
- Kawalec, J. (2017). Stabilisation of unbound aggregate by geogrids for transport infrastructure applications (p. 65). Apresentado na 1º Seminário Geotecnia nos Transportes, Lisboa.
- Klasztorny, M., & Szurgott, P. (2012). Modeling and Simulation of Bridge – Track – Train Systems at High Service Velocities with LS-DYNA® (p. 14). Apresentado na 12th International LS-DYNA Users Conference.
- Koerner, R. M. (1998). *Designing with Geosynthetics* (6.ª ed., Vol. 1). EUA.
- Kwan, C. C. J. (2006). *Geogrid reinforcement of railway ballast*. *Dissertação de Doutoramento*. University of Nottingham, Nottingham.
- Lança, A., Dimitrovová, Z., Barroso, M., & Fontul, S. (2018). Numerical analysis of geogrid contribution to railway track reinforcement (p. 6). Apresentado na MATEC Web of Conferences 211, 12006 (2018) N. Maia, Z. Dimitrovová (Eds). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821112006>, Lisboa.
- LNEC. (2007). *Aplicação de Geossintéticos no controlo da Erosão Superficial e Costeira* (p. 50). Lisboa.
- Lopes, M. P. L., Maria de Lurdes. (2010). *A Durabilidade dos Geossintéticos* (1.ª ed.). FEUP Edições.
- LS-DYNA Manual. (2015). LS-DYNA - Keyword user's manual, Volume I.
- Luís, J. (2013). *Modelo de gestão de obras de via-férrea na perspetiva da empresa construtora*. *Dissertação de Mestrado*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Lundqvist, A., & Dahlberg, T. (2004). Dynamic train/track interaction including model for track settlement evolution. *Vehicle System Dynamics*, 4, 667–676.
- Mishra, D., Qian, Y., Kazmee, H., & Tutumluer, E. (2014). Investigation of Geogrid-Reinforced Railroad Ballast Behavior Using Large-Scale Triaxial Testing and Discrete Element Modeling. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2462(1), 98–108. <https://doi.org/10.3141/2462-12>
- Ngo, N., Indraratna, B., & Rujikiatkamjorn, C. (2014). A study of the behaviour of fresh and coal fouled ballast reinforced by geogrid using the discrete element method. Em K. Soga, K. Kumar, G. Biscontin, & M. Kuo (Eds.), *Geomechanics from Micro to Macro* (pp. 559–563). CRC Press.

- Ngo, N. T., & Indraratna, B. (2016). Improved Performance of Rail Track Substructure Using Synthetic Inclusions: Experimental and Numerical Investigations. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2(3), 2–24.
- NP EN 13450. (2005). Agregados para balastro de via-férrea.
- Paixão, A. L. M. (2009). *Novas soluções de superestrutura de via para a alta velocidade ferroviária: comparação com a via balastrada*; (06–2009.^a ed.). Lisboa: LNEC.
- Paixão, A. L. M. (2014). *Transition zones in railway tracks. Dissertação de Doutoramento*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Pinto, A. (2005). *Aplicação de Geossintéticos em Linhas-Férreas. Estudo laboratorial dos fenómenos de danificação durante a instalação e abrasão nos materiais. Dissertação de Mestrado*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pires, D. (2018). *Reabilitação de infraestruturas ferroviárias. Aplicação de geogrelhas na camada de balastro. Dissertação de Mestrado*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Qian, Y., Mishra, D., Tutumluer, E., & Kwon, J. (2013). Comparative Evaluation of Different Aperture Geogrids for Ballast Reinforcement through Triaxial Testing and Discrete Element Modeling (p. 10). Apresentado na Geosynthetics.
- Rodrigues, A. (2017). *Viability and Applicability of Simplified Models for the Dynamic Analysis of Ballasted Railway Tracks. Dissertação de Doutoramento*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Rosenberger, M., Plöchl, M., Six, K., & Edelmann, J. (Eds.). (2016). The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks: Proceedings of the 24th Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics (IAVSD 2015), Graz, Austria, 17-21 August 2015 (p. 13).
- Sarsby, R. W. (2006). *Geosynthetics in Civil Engineering* (1.^a ed.). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Selig, E. T., & Waters, J. M. (1994). *Track Geotechnology and Substructure Management* (1.^a ed.). Thomas Telford.
- Silva, J. (2009, Agosto 28). Tipo de carril da nossa ferrovia , perfil 54E1. Obtido 14 de Setembro de 2018, de <https://trains.smugmug.com/TRAINS/Curiosidades-Curiosities/i-jGSwwqL>

- Silva, J. (2010). Travessa bibloco de Betão. Obtido 14 de Setembro de 2018, de <https://trains.smugmug.com/TRAINS/Curiosidades-Curiosities/i-rj4VbmQ>
- Silva, J. (2012). Marco Kilométrico / Linha do Douro. Obtido 14 de Setembro de 2018, de <https://trains.smugmug.com/TRAINS/Curiosidades-Curiosities/i-ZMPVzLn>
- Tafari, R. G. (2009). *Estudo numérico das tensões de tração na geogrelha de aterros estruturados. Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Tavares, P. (2009). *Reforço de subestruturas de vias-férreas com geossintéticos. Dissertação de Mestrado*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Tensar. (2012). Obtido de <https://www.railway-technology.com/contractors/engineering/tensar-international/>
- Tutumluer, E., & Al-Qadi, I. L. (2009). *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Two Volume Set: Proceedings of the 8th International Conference (BCR2A'09), June 29 - July 2 2009, University of Illinois at Urbana - Champaign, Champaign, Illinois, USA*. CRC Press.
- Vossloh. (2015). System W14 - Higly elastic rail fastening for high speed and conventional rail - the established solution for ballasted track with concrete sleepers.
- Wang, H., Silvast, M., Markine, V., & Wiljanen, B. (2017). Analysis of the Dynamic Wheel Loads in Railway Transition Zones Considering the Moisture Condition of the Ballast and Subballast. *Applied Sciences*, 7(12), 1208.
- Wen, Z., Jin, X., & Zhang, W. (2005). Contact-impact stress analysis of rail joint region using the dynamic finite element method. *Wear*, 258(7–8), 1301–1309.
- Yap, H. C., Khabbaz, H., & Singh, J. (2017). Numerical analysis of geosynthetics and engineering fill in performance of reconditioned ballasted track. *Australian Geomechanics*, 52(1), 44–55.

\$

*PART

Part	3 for Mat	6 and Elem Type	1
3	1 6	0 0 0	0

\$

*PART

Part	4 for Mat	7 and Elem Type	1
4	1 7	0 0 0	0

\$

*PART

Part	5 for Mat	8 and Elem Type	1
5	1 8	0 0 0	0

\$

*PART

Part	6 for Mat	1 and Elem Type	2
6	2 1	0 0 0	0

\$

*PART

Part	7 for Mat	2 and Elem Type	3
7	3 2	0 0 0	0

\$

*PART

Part	8 for Mat	3 and Elem Type	3
8	3 3	0 0 0	0

\$

*PART

Part	9 for Mat	9 and Elem Type	3
9	3 9	0 0 0	0

\$

*PART

Part	10 for Mat	10 and Elem Type	3
10	3 10	0 0 0	0

\$

*PART

ANEXO 2 – EXCERTO DE APDL

Neste anexo é apresentado uma parte do ficheiro utilizado para a criação do modelo com recurso à APDL:

```
k,10000,0,0,0
k,10001,0,1,0
k,10002,0,0,1
kwplan,,10000,10001,10002

! create areas in cross section and attribute material numbers
! areas
!travessa
i=1
*do,j,1,2
rectng,bb(j),bb(j)+b(j),-hh(i),-hh(i)-h(i)
*enddo
asel,s,area,,1,2
aatt,matr,,,
*get,acc,area,,count

!layers
dec=(bb(5)-bb(4))/(hh(2+nlay)-hh(2))
*do,i,1,nlay
*do,j,1,2
rectng,bb(j),bb(j)+b(j),-hh(i+1),-hh(i+1)-h(i+1)
*enddo
asel,s,area,,acc,acc+2
!sla,s
!ksll,s
k1=kp(0,bb(3),-hh(i+2))
k4=kp(0,bb(3),-hh(i+1))
k,,0,bb(4)+dec*(hh(2+i-1)-hh(2)),-hh(i+1)
k,,0,bb(4)+dec*(hh(2+i)-hh(2)),-hh(i+2)
k3=kp(0,bb(4)+dec*(hh(2+i-1)-hh(2)),-hh(i+1))
k2=kp(0,bb(4)+dec*(hh(2+i)-hh(2)),-hh(i+2))
a,k1,k2,k3,k4
!sel,all
!kset,all
asel,s,area,,acc+1,acc+3
aatt,matr+i,,,
asel,all
*get,acc,area,,count
*enddo

! substrates
*do,i,nlay+1,nlay+nsup
*do,j,1,2
rectng,bb(j),bb(j)+b(j),-hh(i+1),-hh(i+1)-h(i+1)
*enddo
rectng,bb(3),bb(3)+b(3)+b(4),-hh(i+1),-hh(i+1)-h(i+1)
*do,j,5,nl-1
rectng,bb(j),bb(j)+b(j),-hh(i+1),-hh(i+1)-h(i+1)
*enddo
asel,s,area,,acc+1,acc+nl-2
aatt,matr+i,,,
asel,all
*get,acc,area,,count
```

```

*enddo

! plot them in colors
/PNUM,MAT,1
/num,1
aplot

nummrg,kp
MSHAPE,0,3D

! set divisions
asel,s,area,,1,nlay*3+2
lsla,s
lesize,all,els,

*get,l3,area,2+3,loop,1,line,3
*get,ldiv3,line,l3,attr,ndnx

*do,i,1,nlay
*get,ll,area,2+3*i,loop,1,line,1
lesize,ll,,ldiv3,
*get,l4,area,2+3*i,loop,1,line,4
*get,ldiv4,line,l4,attr,ndnx
*get,ll,area,2+3*i,loop,1,line,2
lesize,ll,,ldiv4,
*enddo

*do,i,1,nsub
asel,s,area,,2+3*nlay+(i-1)*(nl-2)+1,2+3*nlay+i*(nl-2)
lsla,s
lesize,all,4*i*els,
*do,k,1,3
*get,l3,area,2+3*nlay+(i-1)*(nl-2)+k,loop,1,line,3
*get,ldiv3,line,l3,attr,ndnx
*get,l1,area,2+3*nlay+(i-1)*(nl-2)+k,loop,1,line,1
lesize,l1,,ldiv3,
*enddo
*if,i,ne,1,then
k=4
*get,l3,area,2+3*nlay+(i-1)*(nl-2)+k,loop,1,line,3
*get,ldiv3,line,l3,attr,ndnx
*get,l1,area,2+3*nlay+(i-1)*(nl-2)+k,loop,1,line,1
lesize,l1,,ldiv3,
*endif
*enddo

asel,all
lsel,all

! make it 3D #####

*get,nar,area,,count
*get,a1,area,,num,min

*do,i,1,nar
*get,mta,area,a1,attr,mat
mat,mta
type,etvl
VOFFST,a1,len,
vsel,s,volu,,i

```

```
vatt,mta,,etvl,  
a1=arnext(a1)  
*enddo
```

```
vsel,all  
nummrg,kp
```

```
lsel,s,loc,x,len/2-els,len/2+els  
lesize,all,ell  
lsel,all
```

```
*do,i,1,nar,  
vsweep,i  
*enddo
```

```
! extend to symmetry  
VSYMM,Y,all,, , ,0,0  
nummrg,kp  
nummrg,node  
modmsh,detach  
numcmp,line
```



```

*vwrite
*DEFINE_SD_ORIENTATION
*vwrite,1,0,1.,0.,0.
%10I%10I%10.0F%10.0F%10.0F
*vwrite
*DEFINE_SD_ORIENTATION
*vwrite,2,0,0.,1.,0.
%10I%10I%10.0F%10.0F%10.0F
*vwrite
*DEFINE_SD_ORIENTATION
*vwrite,3,0,0.,0.,1.
%10I%10I%10.0F%10.0F%10.0F
/output

!write the additional springs
/output,file,ext,dir,append
*vwrite
*ELEMENT_DISCRETE
/output

*get,elmax,elem,,num,max

cmsel,s,front,node
cmsel,a,end,node
nset,u,loc,z,-depth-els/10,-depth+els/10
nset,u,loc,z,0,10

*get,n1,node,,num,min
*get,ntot,node,,count
*do,i,1,ntot
/output,file,ext,dir,append
*vwrite,elmax+3*(i-1)+1,partmax+1,n1,0,1,0.,0,0.
%8I%8I%8I%8I%8I%16.9E%8I%16.9E
*vwrite,elmax+3*(i-1)+2,partmax+2,n1,0,2,0.,0,0.
%8I%8I%8I%8I%8I%16.9E%8I%16.9E
*vwrite,elmax+3*(i-1)+3,partmax+2,n1,0,3,0.,0,0.
%8I%8I%8I%8I%8I%16.9E%8I%16.9E
/output
n1=ndnext(n1)
*enddo

elmax=elmax+3*ntot

cmsel,s,left,node
cmsel,a,right,node
nset,u,loc,z,-depth-els/10,-depth+els/10

*get,n1,node,,num,min
*get,ntot,node,,count
*do,i,1,ntot
/output,file,ext,dir,append
*vwrite,elmax+3*(i-1)+1,partmax+1,n1,0,2,0.,0,0.
%8I%8I%8I%8I%8I%16.9E%8I%16.9E
*vwrite,elmax+3*(i-1)+2,partmax+2,n1,0,1,0.,0,0.
%8I%8I%8I%8I%8I%16.9E%8I%16.9E
*vwrite,elmax+3*(i-1)+3,partmax+2,n1,0,3,0.,0,0.
%8I%8I%8I%8I%8I%16.9E%8I%16.9E
/output
n1=ndnext(n1)
*enddo

```

```

elmax=elmax+3*ntot

cmsel,s,bottom,node

*get,n1,node,,num,min
*get,ntot,node,,count
*do,i,1,ntot
/output,file,ext,dir,append
*vwrite,elmax+3*(i-1)+1,partmax+3,n1,0,3,0.,0,0.
%8I%8I%8I%8I%8I%16.9E%8I%16.9E
*vwrite,elmax+3*(i-1)+2,partmax+4,n1,0,2,0.,0,0.
%8I%8I%8I%8I%8I%16.9E%8I%16.9E
*vwrite,elmax+3*(i-1)+3,partmax+4,n1,0,1,0.,0,0.
%8I%8I%8I%8I%8I%16.9E%8I%16.9E
/output
n1=ndnext(n1)
*enddo

nset,all

!define the left beam

/output,file,ext,dir,append
*vwrite
*SET_BEAM
*vwrite,1
%10I
/output

esel,s,type,,etbm
esel,r,real,,rebm
nsle,s
nset,r,loc,y,ca/2-ell,ca/2+ell
esln,s
esel,r,type,,etbm
*get,ne,elem,,count

!define number of lines for each beam
nlin=nint(ne/8)
*if,nlin*8,gt,ne,then
nlin=nlin-1
*endif
zbytek=ne-nlin*8

*do,i,1,nlin
*get,ne1,elem,,num,min
*do,j,2,8
ne%j%=elnext(ne%j-1%)
esel,u,elem,,ne%j-1%
*enddo
esel,u,elem,,ne%j%

/output,file,ext,dir,append
*vwrite,ne1,ne2,ne3,ne4,ne5,ne6,ne7,ne8
%10I%10I%10I%10I%10I%10I%10I%10I%10I
/output,
*enddo

*if,zbytek,gt,0,then

```

```

*get,ne1,elem,,num,min
*do,j,2,zbytek
ne%j%=elnext(ne%-1%)
esel,u,elem,,ne%-1%
*enddo
esel,u,elem,,ne%j%
*endif

*if,zbytek,eq,1,then
/output,file,ext,dir,append
*vwrite,ne1
%10I
/output,
*endif

*if,zbytek,eq,2,then
/output,file,ext,dir,append
*vwrite,ne1,ne2
%10I%10I
/output,
*endif

*if,zbytek,eq,3,then
/output,file,ext,dir,append
*vwrite,ne1,ne2,ne3
%10I%10I%10I
/output,
*endif

*if,zbytek,eq,4,then
/output,file,ext,dir,append
*vwrite,ne1,ne2,ne3,ne4
%10I%10I%10I%10I
/output,
*endif

*if,zbytek,eq,5,then
/output,file,ext,dir,append
*vwrite,ne1,ne2,ne3,ne4,ne5
%10I%10I%10I%10I%10I
/output,
*endif

*if,zbytek,eq,6,then
/output,file,ext,dir,append
*vwrite,ne1,ne2,ne3,ne4,ne5,ne6
%10I%10I%10I%10I%10I%10I
/output,
*endif

*if,zbytek,eq,7,then
/output,file,ext,dir,append
*vwrite,ne1,ne2,ne3,ne4,ne5,ne6,ne7
%10I%10I%10I%10I%10I%10I%10I
/output,
*endif

!define the right beam

/output,file,ext,dir,append

```

```

*vwrite
*SET_BEAM
*vwrite,2
%10I
/output

esel,s,type,,etbm
esel,r,real,,rebm
nsle,s
nsel,r,loc,y,-ca/2-ell,-ca/2+ell
esln,s
esel,r,type,,etbm

*do,i,1,nlin
*get,ne1,elem,,num,min
*do,j,2,8
ne%j%=elnext(ne%-1%)
esel,u,elem,,ne%-1%
*enddo
esel,u,elem,,ne%j%

/output,file,ext,dir,append
*vwrite,ne1,ne2,ne3,ne4,ne5,ne6,ne7,ne8
%10I%10I%10I%10I%10I%10I%10I%10I
/output,
*enddo

*if,zbytek,gt,0,then
*get,ne1,elem,,num,min
*do,j,2,zbytek
ne%j%=elnext(ne%-1%)
esel,u,elem,,ne%-1%
*enddo
esel,u,elem,,ne%j%
*endif

*if,zbytek,eq,1,then
/output,file,ext,dir,append
*vwrite,ne1
%10I
/output,
*endif

*if,zbytek,eq,2,then
/output,file,ext,dir,append
*vwrite,ne1,ne2
%10I%10I
/output,
*endif

*if,zbytek,eq,3,then
/output,file,ext,dir,append
*vwrite,ne1,ne2,ne3
%10I%10I%10I
/output,
*endif

*if,zbytek,eq,4,then
/output,file,ext,dir,append
*vwrite,ne1,ne2,ne3,ne4

```

%10I%10I%10I%10I

/output,
*endif

*if,zbytek,eq,5,then

/output,file,ext,dir,append
*vwrite,ne1,ne2,ne3,ne4,ne5
%10I%10I%10I%10I%10I
/output,
*endif

*if,zbytek,eq,6,then

/output,file,ext,dir,append
*vwrite,ne1,ne2,ne3,ne4,ne5,ne6
%10I%10I%10I%10I%10I%10I
/output,
*endif

*if,zbytek,eq,7,then

/output,file,ext,dir,append
*vwrite,ne1,ne2,ne3,ne4,ne5,ne6,ne7
%10I%10I%10I%10I%10I%10I%10I
/output,
*endif

allsel,all

!rail track and train

/output,file,ext,dir,append

*vwrite

*RAIL_TRACK

*vwrite,1,1,nrail1,0,0.,1.,0.

%10I%10I%10I%10I%10.3F%10.6F%10.3F

*vwrite,2,nrail2,0,0.,1.,0.

%20I%10I%10I%10.3F%10.6F%10.3F

*vwrite

*RAIL_TRAIN

*vwrite,1,2,0.,0.,0.,1,0,0.

%10I%10I%10.3F%10.3F%10.3F%10I%10I%10.3F

*vwrite,2.e10,0.,0.,0.,0.,0.

%10.3E%10.3F%10.3F%10.3F%10.3F%10.3F

*vwrite

*END

/output