

TRATAMENTO DE PLATAFORMAS EM VIAS FERROVIÁRIAS

ANA ALEXANDRA SANTOS CABO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS E GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor Eduardo Manuel Cabrita Fortunato

Coorientador: Engenheiro João Ricardo Araújo Monteiro da Rocha

JUNHO DE 2023

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2022/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2022/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2023.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha mãe,

“Todo o trabalho é vazio a não ser que haja amor”

Khalil Gibran

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação não teria sido possível sem o apoio de algumas pessoas especiais, às quais dedico estas palavras de profundo agradecimento.

Ao meu orientador, Prof. Doutor Eduardo Fortunato por toda a disponibilidade, partilha de conhecimento e ajudas prestadas.

Ao engenheiro João Rocha, pela amabilidade e disponibilidade em esclarecer as minhas dúvidas.

À engenheira Odete Parente e ao engenheiro Bruno Catarino, pela paciência constante e prontidão no fornecimento de material que foi indispensável na realização desta dissertação.

À engenheira Tânia Silva, ao engenheiro Filipe Martins, e à engenheira Beatriz Alves, pela disponibilidade em me mostrar o verdadeiro contexto de obra.

À minha mãe, por todo o esforço diário, pelo amor incondicional e por nunca me ter deixado desistir do meu sonho.

Ao Marco, pela eterna paciência, companheirismo, encorajamento e afeto que manifesta dia após dia.

À D. Ana e ao Sr. Albuquerque, por me fazerem acreditar novamente no conceito de família.

Aos companheiros desta longa jornada que foi a FEUP, Mafalda Ramos, José Mendes, Larissa Cabrera, Célia Assunção, entre outros, pela partilha, apoio constante e carinho demonstrados.

RESUMO

Após a construção da via-férrea, é crucial monitorizar regularmente as condições do solo para identificar quaisquer mudanças ou problemas. Caso sejam detetados casos de instabilidade ou outras questões, é necessário aplicar técnicas de tratamento adequadas para garantir a estabilidade, segurança e durabilidade da infraestrutura ferroviária.

No entanto, é importante observar que o tratamento de plataformas em vias-férreas nem sempre leva em consideração aspetos ambientais e económicos. Neste estudo, o objetivo é apresentar uma hipótese alternativa em relação à utilização de materiais tradicionais, que podem exigir extração de solos em áreas próximas ou aquisição de materiais de empréstimo. Para realizar essa análise, foi necessário estudar estes materiais alternativos e as técnicas de tratamento utilizadas.

O documento começa com uma descrição dos elementos que constituem a via-férrea balastrada e suas funções. Em seguida, são apresentadas as várias técnicas de tratamento de plataformas, juntamente com uma breve revisão bibliográfica sobre os mecanismos de degradação da subestrutura ferroviária.

Numa fase subsequente, faz-se uma descrição detalhada de um caso de estudo específico, abordando as soluções de tratamento de plataforma adotadas em projeto. Neste contexto, é estudada e analisada uma hipótese alternativa, utilizando métodos empíricos e dados fornecidos pelo empreiteiro. Esta análise permite determinar a espessura ideal da camada de coroamento (ou de leito), levando em consideração também a aplicação de um método de tratamento *in situ*.

Por fim, as soluções são avaliadas tanto em termos económicos quanto ambientais, considerando os impactos financeiros e as consequências para o meio ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: plataforma ferroviária, tratamento de plataformas, solo estabilizado com cal e cimento, camada de coroamento, custo-benefício.

ABSTRACT

After the construction of the railway track, it is crucial to regularly monitor the ground conditions to identify any changes or problems. If cases of instability or other issues are detected, appropriate treatment techniques must be applied to ensure the stability, safety and durability of the railway infrastructure.

However, it is important to note that the treatment of platforms on railways does not always take into consideration environmental and economic aspects. In this study, the objective is to present an alternative hypothesis in relation to the use of traditional materials, which may require soil extraction in nearby areas or the acquisition of borrow materials. To carry out this analysis, it was necessary to study these alternative materials and the treatment techniques used.

The work begins with a description of the elements that constitute ballasted track and their functions. Next, the various platform treatment techniques are presented, along with a brief literature review on the degradation mechanisms of the railway substructure.

In a subsequent step, a detailed description of a specific case study is made, addressing the platform treatment solutions adopted by the building contractor. In this context, the alternative hypothesis studied is analysed, using empirical methods and data provided by the company itself. This analysis allows determining the ideal thickness of the capping layer, also taking into consideration the application of an *in situ* treatment method.

Finally, the solutions are evaluated both in economic and environmental terms, considering the financial impacts and the consequences to the environment.

KEYWORDS: railway platform, treatment of platforms, soil stabilized with lime and cement, capping layer, cost-benefit analysis.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. CARACTERÍSTICAS DA VIA-FÉRREA	5
2.1 CONCEITOS GERAIS	5
2.2 SUPERESTRUTURA DA VIA-FÉRREA	7
2.2.1 CARRIS.....	7
2.2.2 ELEMENTOS DE FIXAÇÃO.....	8
2.2.3 TRAVESSAS.....	9
2.2.4 BALASTRO.....	12
2.3 SUBESTRUTURA DA VIA-FÉRREA	15
2.3.1 SUB-BALASTRO.....	15
2.3.2 FUNDAÇÃO.....	17
3. TRATAMENTO DE PLATAFORMAS FERROVIÁRIAS	19
3.1 INTRODUÇÃO	19
3.2 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DA SUBESTRUTURA FERROVIÁRIA	19
3.2.1 ROTURA PROGRESSIVA POR CORTE E DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EXCESSIVA.....	19
3.2.2 ROTURA GLOBAL DA FUNDAÇÃO.....	21
3.2.3 DESGASTE DA PLATAFORMA E BOMBAGEM DE FINOS.....	21
3.2.4 LIQUEFAÇÃO DOS SOLOS.....	22
3.2.5 ASSENTAMENTOS POR CONSOLIDAÇÃO DE CAMADAS.....	22
3.2.6 CONGELAÇÃO DOS SOLOS DEVIDO A AÇÃO DO GELO.....	23
3.3 REFORÇO E MELHORAMENTO DO SOLO DA PLATAFORMA	23
3.3.1 TRATAMENTOS COM CAL AÉREA.....	23
3.3.2 SANEAMENTO E SUBSTITUIÇÃO DO TERRENO.....	25

3.3.3	DRENOS VERTICAIS.....	26
3.3.4	INJEÇÃO DE CALDAS DE CIMENTO POR FRACTURAÇÃO HIDRÁULICA.....	28
3.3.5	COMPACTAÇÃO DINÂMICA PROFUNDA.....	29
3.3.6	DEEP SOIL MIXING.....	30
3.3.7	COMPACTAÇÃO COM EXPLOSIVOS.....	30
3.3.8	JET-GROUTING.....	31
3.3.9	COLUNAS DE BRITA.....	33
3.3.10	GEOSSINTÉTICOS.....	34
3.4	PEGADA DE CARBONO ASSOCIADA À VIA-FÉRREA.....	35
3.5	CATEGORIZAÇÃO DE CUSTOS NOS DIVERSOS TRATAMENTOS.....	36
3.5.1	PESSOAL.....	37
3.5.2	COMPRAS/MATERIAIS.....	37
3.5.3	EQUIPAMENTOS.....	37
3.5.4	SUBEMPREITADAS.....	38
3.5.5	CUSTOS DE ESTALEIRO.....	38
3.5.6	ENCARGOS DE ESTRUTURA.....	38
4.	CASO DE ESTUDO.....	39
4.1	ENQUADRAMENTO.....	39
4.2	IDENTIFICAÇÃO DAS ZONAS A TRATAR.....	40
4.3	SOLUÇÕES DE TRATAMENTO ADOTADAS.....	41
4.4	CONDICIONANTES ENCONTRADAS NA OBRA.....	44
4.4.1	ACESSIBILIDADES.....	44
4.4.2	PERÍODO NOTURNO/ PERÍODO DIURNO.....	45
4.4.3	DISTÂNCIA DA PEDREIRA.....	46
4.4.4	ÁREA PARA EXECUÇÃO DE STOCKS.....	46
4.4.5	TEMPO DE INTERDIÇÃO DISPONÍVEL.....	47
4.4.6	QUALIDADE DOS ATERROS EXISTENTES.....	47
4.5	SOLUÇÃO ALTERNATIVA DE TRATAMENTO DO SOLO COM CAL E CIMENTO.....	47
4.5.1	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO A TRATAR.....	48
4.5.2	DEFINIÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA ADOTADA.....	50
4.6	COMPARAÇÃO ENTRE A SOLUÇÃO TRADICIONAL E A SOLUÇÃO ALTERNATIVA.....	52
4.6.1	ESTIMATIVA DE CUSTO COM BASE NA NATUREZA DOS RECURSOS ENVOLVIDOS.....	52
4.6.1.1	Solução tradicional.....	52
4.6.1.2	Solução alternativa.....	54

4.6.2	CUSTO ASSOCIADO ÀS DIVERSAS ETAPAS CONSTRUTIVAS	55
4.6.3	IMPACTO AMBIENTAL	57
5.	CONCLUSÃO	59
5.1	CONCLUSÕES GERAIS DA DISSERTAÇÃO.....	59
5.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 - Representação longitudinal da via-férrea balastrada (Fortunato, 2005)	6
Fig. 2 - Representação transversal da via-férrea balastrada (Fortunato, 2005).....	6
Fig. 3 - Representação de um perfil de carril UCI 60 (ArcelorMittal s.d., 2023)	8
Fig. 4 - Elemento de fixação rígido (Rubinsztejn, 2011)	8
Fig. 5 - Elementos de fixação elásticos: a) sistema de fixação Pandrol; b) sistema de fixação Nabla (Fernandes, 2011)	9
Fig. 6 – Via balastrada assente em travessas de diferentes composições: a) travessas em madeira (cobblumber, 2023); b) travessas metálicas (Hidremec s.d., 2023)	10
Fig. 7 - Via-férrea em travessas monobloco (em cima) e bi-bloco (em baixo) (Autora, 2023)	11
Fig. 8 - Perfil transversal de uma TBB e de uma TBM, respetivamente (IS.COM, 2021)	11
Fig. 9 - Travessas de material compósito (Oliveira, 2012)	12
Fig. 10 - Vagões de balastro novo (Autora, 2023)	13
Fig. 11 - Superestrutura de uma via balastrada no sentido transversal (Vale, 2010).....	14
Fig. 12 - Superestrutura de uma via balastrada no sentido longitudinal (Vale, 2010)	14
Fig. 13 - Camada de sub-balastro (Fortunato, 2014).....	16
Fig. 14 – Rotura progressiva por corte (Radampola, 2006).....	20
Fig. 15 – Formação de bolsadas de balastro (Radampola, 2006).....	20
Fig. 16 – Esquema de rotura global por corte da fundação (Fortunato, 2005).....	21
Fig. 17 – Balastro contaminado assente sobre uma plataforma de material fino (Fortunato, 2005)....	22
Fig. 18 – Execução da estabilização por via seca (Cruz, 2008)	24
Fig. 19 – Execução da estabilização por via húmida (Cruz, 2008)	24
Fig. 20 – Mistura de cal no terreno (Wirtgen, 2023).....	25
Fig. 21 – Sequência executiva de substituição de solo mole (Almeida e Marques, 2010).....	26
Fig. 22 – Processo de execução de drenos em areia (Antunes, 2016)	27
Fig. 23 – Instalação de geodrenos: a) pormenor de um dreno pré-fabricado (American Wick Drain, 2023); b) vista geral (GeoSoluções, 2023)	28
Fig. 24 – Execução de injeção por fraturação hidráulica (Keller, 2023)	28
Fig. 25 – Processo de execução da compactação dinâmica (Liebherr, 2023)	29
Fig. 26 – Colunas de Deep Soil Mixing (RAITO, Inc., 2023).....	30
Fig. 27 – Processo de execução da compactação com explosivos (theconstructor.org, 2023).....	31
Fig. 28 – Diagrama esquemático da técnica de Jet-grouting (Hayward Baker, 2023)	32
Fig. 29 – Diferentes tipos de Jet-grouting (Railssystem.net, 2023)	32

Fig. 30 – Execução de colunas de brita com recurso à vibrosubstituição (TERRATEST, 2023)	33
Fig. 31 – Diferentes tipos de geossintéticos: a) manta geotêxtil; b) geogrelha triaxial (Sotecnisol, 2023); c) geocélula (geosoluções, 2023)	34
Fig. 32 – Localização do subtroço Cerdeira/Vilar Formoso (Conduril, 2020)	39
Fig. 33 – Execução da solução 1: a) escavação até ao nível da camada de coroamento; b) compactação da camada de sub-balastro (Conduril, 2022).....	41
Fig. 34 – Execução da solução 2: a) Início do processo de escavação; b) compactação da camada de coroamento (Conduril, 2022).....	42
Fig. 35 – Processo de colocação do geotêxtil e do rachão: a) escavação até à cota necessária para colocação do geotêxtil; b) preenchimento da camada de rachão (Conduril, 2022)	43
Fig. 36 – Execução da camada de coroamento (Conduril, 2022).....	43
Fig. 37 – Colocação do novo balastro (Conduril, 2022).....	44
Fig. 38 – Criação de acessibilidades à obra: a) Terreno inicial antes da abertura do acesso b) Terreno acessível à passagem de equipamentos (Conduril, 2021)	45
Fig. 39 – Torres de iluminação (Conduril, 2022)	45
Fig. 40 – Área escolhida para a execução de stocks (Conduril, 2022)	46
Fig. 41 – Esquema elucidativo da execução da estabilização do solo com cimento (Wirtgen, 2023) ..	47
Fig. 42 – Classificação de solos com dimensão máxima ≤ 50 mm (LCPC e SETRA, 1992)	48
Fig. 43 – Classificação de solos com dimensão máxima > 50 mm (LCPC e SETRA, 1992)	49
Fig. 44 – Classificação do material tratado com ligantes em função de R_t e E (LCPC/SETRA, 2000) 51	

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Constituição de um tipo de travessa de material compósito (Oliveira, 2012).....	12
Quadro 2 – Valores limite dos requisitos técnicos do balastro (RF.IT.VIA.015).....	15
Quadro 3 - Exigências para a camada de sub-balastro segundo a IT.GEO.006 (REFER, 2007).....	16
Quadro 4 - Classe da capacidade de carga da plataforma (UIC, 2008).....	18
Quadro 5 - Características dos solos para plataformas ferroviárias (Fortunato, 2005).....	18
Quadro 6 – Indicadores de sustentabilidade (Agência Portuguesa do Ambiente, 2010)	35
Quadro 7 – Troços alvo de tratamento de plataforma (Conduril, 2019)	41
Quadro 8 – Classificação dos materiais ocorrentes ao nível da camada de coroamento (Conduril, 2019)	49
Quadro 9 – Modalidades de tratamento a aplicar em função da classe do solo (LCPC/SETRA, 2000)	50
Quadro 10 – Determinação da classe mecânica de um material tratado em função das suas características e do seu modo de fabrico (LCPC/SETRA, 2000)	51
Quadro 11 – Resultados obtidos nos ensaios de carga com placa (Conduril, 2019).....	52
Quadro 12 – Determinação da classe de plataforma (PF) em função da classe mecânica do material de leito (LCPC/SETRA, 2000).....	52
Quadro 13 – Estimativa do custo da mão de obra.....	53
Quadro 14 – Estimativa do custo dos equipamentos.....	53
Quadro 15 – Estimativa do custo dos materiais.....	54
Quadro 16 – Estimativa do custo da mão de obra.....	54
Quadro 17 – Estimativa do custo dos equipamentos.....	55
Quadro 18 – Estimativa do custo dos materiais.....	55
Quadro 19 – Custos de construção de um aterro com material de empréstimo	56
Quadro 20 – Custos de construção de uma camada com solo tratado <i>in situ</i>	56

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABGE – Agregado Britado de granulometria extensa

AFNOR – Association Française de Normalisation

AMV – Aparelho de mudança de via

BLS – Barra longa soldada

C – Comprimento

CBR – California Bearing Ratio

E – Módulo de deformabilidade

ECP – Ensaio de Carga com Placa

EN – European standard

F – Finos

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FI – Índice de Achatamento

GEE – Gases com efeito de estufa

GTR – Guide Terrassements Routiers

IP – Infraestruturas de Portugal

IT – Instrução Técnica

IVA – Imposto sobre Valor Acrescentado

K - Coeficiente de permeabilidade

LA – Los Angeles

LCPC – Laboratoire Central dês Ponts et Chaussées

MB – Azul de Metileno

MDE – Micro-Deval

MS – Sulfato de magnésio

NF – Norma Francesa

NP – Norma Portuguesa

PAV – Poços de auscultação da plataforma de via

Pf – Partículas finas

PF – Plate-forme

QN – Índice de qualidade de via

REFER – Rede Ferroviária Nacional

SETRA – Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes

SI – Índice de Forma

TBB – Travessa de Betão Bi-bloco

TBM – Travessa de Betão Monobloco

UCI – L'Union internationale des chemins de fer

USC – Unified Soil Classification

VBS – Methylene blue value

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO GERAL

O sistema ferroviário desempenha um papel fundamental no transporte de pessoas e mercadorias de forma eficiente, segura e sustentável.

O transporte ferroviário teve origem nas minas britânicas do século XIX, onde as locomotivas a vapor eram utilizadas para transportar o minério. Posteriormente, já no ano de 1835, este meio de transporte foi adaptado para o transporte de passageiros e mercadorias, com veículos atingindo velocidades na ordem dos 100 km/h.

O seu aparecimento e utilização desempenharam um papel crucial no surgimento de novas indústrias e no desenvolvimento socioeconómico das sociedades, especialmente durante a Revolução Industrial. Durante o século XIX, houve diversos avanços neste modo de transporte, resultando na construção de linhas ferroviárias ao redor do mundo que futuramente se foram expandindo.

Em Portugal, os caminhos de ferro desempenharam um papel significativo ao longo da evolução histórica do país. A sua história remonta a 1856, quando ocorreu o marco inicial com a primeira locomotiva a partir do Cais dos Soldados, que atualmente é conhecido como Estação de Santa Apolónia. Desde essa altura que a construção de novas linhas e a expansão da rede começaram a ocorrer em ritmo acelerado, promovendo a conectividade, o desenvolvimento económico e a mobilidade das pessoas.

Com o passar dos anos, as linhas férreas existentes tendem a degradar-se devido ao seu uso continuado, condições climatéricas, movimentações do solo, entre outros fatores. Existe assim a necessidade de haver uma manutenção regular para garantir a segurança, confiabilidade e eficiência do sistema ferroviário. Para além da manutenção é, por vezes, necessário levar a cabo processos de reabilitação, que podem contemplar a superestrutura e a subestrutura da via-férrea.

A fundação da via, por vezes designada de plataforma, desempenha um papel essencial na estabilidade e segurança da via-férrea, servindo como suporte para as camadas de apoio (balastro e sub-balastro) e para o armamento da via (carris, travessas e fixações).

Os trabalhos de reabilitação envolvem a realização de obras de reforço ou até mesmo a reconstrução da infraestrutura. Estas medidas visam melhorar a plataforma existente, corrigir deficiências e garantir que ela esteja em conformidade com os padrões de qualidade e segurança estabelecidos. A reabilitação pode envolver a aplicação de técnicas especializadas, como o melhoramento do solo, a estabilização de taludes e a substituição de materiais desgastados ou danificados. Para além disso, uma compactação

adequada do solo e a utilização de dispositivos de drenagem eficientes são fundamentais para minimizar os efeitos da água sobre a plataforma, visto ser um dos fatores de degradação.

Nos dias de hoje, há uma crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental e económica nas técnicas utilizadas no tratamento de plataformas em vias-férreas. É evidente a evolução em curso para a incorporação de métodos mais sustentáveis e eficientes no decorrer do processo.

Do ponto de vista ambiental, as técnicas de tratamento de plataformas procuram reduzir a utilização de materiais de origem não renovável, minimizar a geração de resíduos e a emissão de poluentes durante as obras. Além disso, estão a ser cada vez mais adotadas abordagens que visam preservar a biodiversidade local e minimizar a perturbação de ecossistemas sensíveis próximos das linhas ferroviárias.

Em termos económicos, as diversas técnicas de tratamento têm vindo a ser aprimoradas para otimizar o uso de recursos, reduzir os custos de construção e manutenção, e aumentar a durabilidade e vida útil das plataformas. Isto inclui o desenvolvimento de soluções mais duráveis e de baixa manutenção, bem como a implementação de práticas de gestão eficiente dos recursos naturais utilizados nas obras.

Além disso, é cada vez mais comum a adoção de técnicas de melhoramento do solo, como a estabilização e reforço geotécnico, que permitem melhorar as propriedades do solo existente em vez de recorrer a materiais adicionais. Isto reduz a necessidade de extração de recursos naturais e diminui os custos associados ao transporte de materiais.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta dissertação é analisar uma solução alternativa para a execução da camada de coroamento (ou leito) numa linha ferroviária. Tendo em consideração que a obra que foi objeto de estudo já se encontra em fase de construção, não é possível alterar o projeto, que contempla uma solução clássica de substituição de materiais da fundação com características geotécnicas inadequadas. No entanto, pretende-se apurar as vantagens e desvantagens, tanto em termos económicos quanto ambientais, de uma solução alternativa, que contempla o tratamento de solos *in situ*.

A realização da dissertação em ambiente empresarial, em colaboração com a empresa Conduril - Engenharia, S.A., permitiu adquirir um conhecimento prático sobre os desafios enfrentados neste tipo de obras e como eles podem ser superados.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por cinco capítulos, sendo descritos seguidamente.

No presente capítulo, é efetuada uma abordagem geral do tema tratado neste documento, bem como dos objetivos e metodologias aplicadas no decorrer deste trabalho.

No capítulo 2, procede-se à identificação dos vários elementos existentes numa via-férrea, enumerando as suas características e respetivas funções.

No capítulo 3, é feita uma descrição dos mecanismos que levam à degradação da subestrutura ferroviária e de algumas possíveis soluções de reforço e melhoramento do solo da plataforma. É feita ainda uma breve referência a custos económicos e ambientais, fatores a ter em conta nos diversos tipos de tratamentos da fundação da via.

No capítulo 4, faz-se uma apresentação do caso de estudo. Inicialmente é feita uma descrição das soluções utilizadas na obra objeto de análise, tendo presentes as várias condicionantes. De seguida, é analisada uma solução alternativa de tratamento da camada de coroamento e comparada, em termos económicos e ambientais, com a solução tradicional de substituição de material.

Para finalizar, apresenta-se no capítulo 5 as conclusões sobre os temas abordados e propostas de desenvolvimentos futuros.

2

CARACTERÍSTICAS DA VIA-FÉRREA

2.1 CONCEITOS GERAIS

A principal função da infraestrutura ferroviária é assegurar a circulação ferroviária de forma segura, confortável e económica. Para cumprir todos estes requisitos é crucial conhecer-se o comportamento da via e de cada um dos seus constituintes, quantificando a sua importância (Fernandes, 2011).

A via-férrea comporta-se de maneira algo complexa. Esta complexidade decorre da interação entre os vários componentes do sistema que reagem às ações dos veículos em diferentes condições ambientais. Para satisfazer as demandas impostas, é crucial que cada elemento desempenhe a sua função de forma a manter o sistema estável, evitando assim quer deformações permanentes quer o desgaste dos componentes (Fortunato, 2005).

Existem três tipos possíveis de conceção de uma via-férrea, nomeadamente: i) via balastrada; ii) via não balastrada; iii) via de apoio misto. Dada a sua vasta utilização, a primeira solução será o foco desta dissertação.

A via balastrada é uma solução estrutural que, dadas as suas características, tem um bom comportamento dinâmico relativamente às ações impostas pelos veículos que nela circulam.

Esta tipologia é, até hoje, a mais utilizada em todo o mundo pois permite alcançar uma boa qualidade construtiva a um baixo custo e uma facilidade de manutenção, quando comparada com a via não balastrada ou “*Slab Track*”. Neste tipo de solução, o balastro é substituído por uma laje de betão ou mistura betuminosa, formando uma estrutura simultaneamente mais rígida e frágil, à qual são adicionados certos componentes que lhe conferem a elasticidade necessária.

Uma via-férrea balastrada pode dividir-se em duas grandes categorias, nomeadamente a superestrutura que é constituída pelos carris, travessas, elementos de ligação e balastro, e a subestrutura que é composta pelo sub-balastro, camada de coroamento e fundação, por vezes designada de plataforma.

Na Fig. 1 apresentam-se esquematicamente os elementos em perfil longitudinal de uma via-férrea balastrada e na Fig. 2 apresenta-se uma representação transversal da mesma.

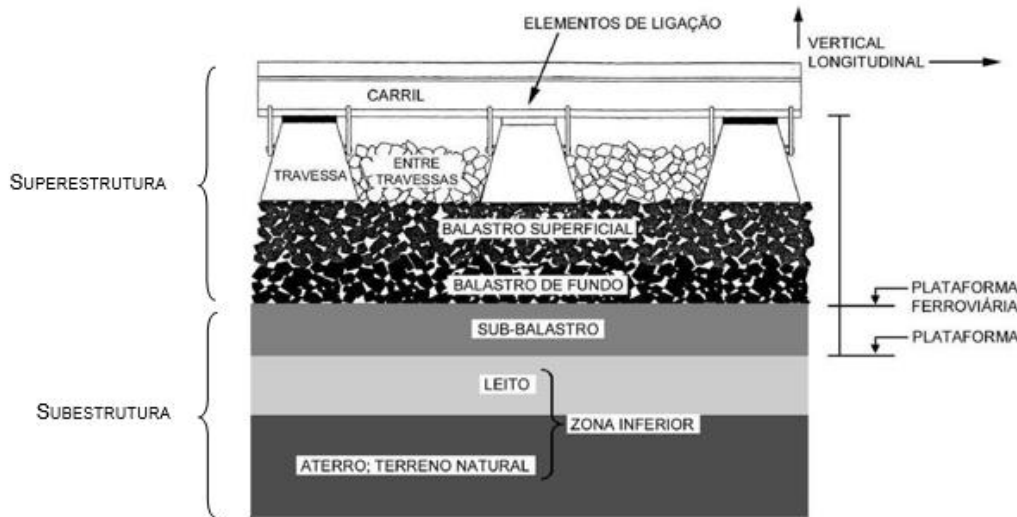


Fig. 1 - Representação longitudinal da via-férrea balastrada (Fortunato, 2005)

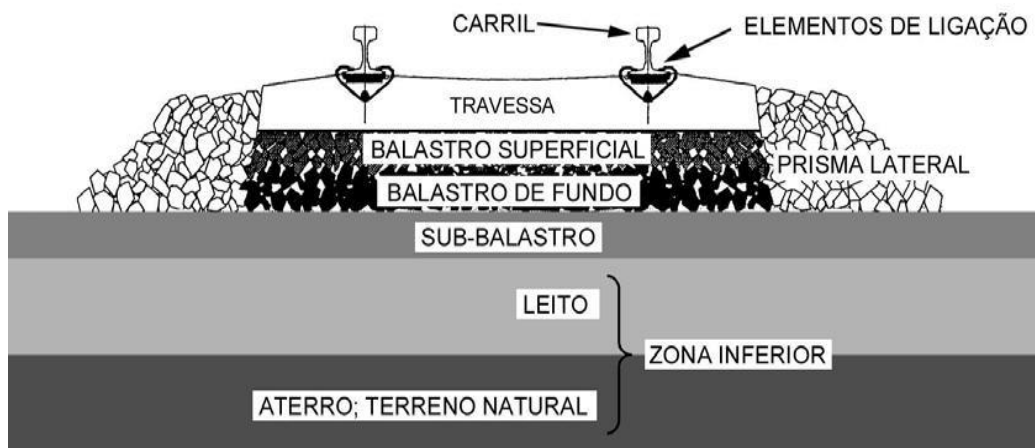


Fig. 2 - Representação transversal da via-férrea balastrada (Fortunato, 2005)

2.2 SUPERESTRUTURA DA VIA-FÉRREA

2.2.1 CARRIS

Os carris são feitos de aço e têm a função de suportar e transferir às travessas as cargas dos veículos que circulam na via, assim como de impor uma determinada direção às rodas destes. Estes elementos devem ser suficientemente rígidos para que possam funcionar como vigas, cuja função vai ser transferir as cargas concentradas das rodas para as travessas – as quais funcionam como apoios afastados de determinado comprimento – sem que haja flexão excessiva. Com a movimentação dos veículos, é estabelecida uma onda com determinado comprimento ao longo do carril, que se propaga com o deslocamento daqueles. (DiPilato et al., 1983).

O valor da rigidez à flexão dos carris é diretamente proporcional à respetiva altura, ou seja, quanto mais altos forem, mais rígidos se tornam, permitindo assim uma redução nos assentamentos das travessas e na solicitação sobre as camadas de apoio.

O perfil transversal de um carril é dividido por três partes bastante distintas: cabeça, (parte superior do perfil, servindo a sua face para rolamento das rodas), alma (elemento vertical que liga a cabeça à patilha) e patilha (base inferior do carril, que se apoia nas travessas, com a palmilha interposta).

Uma das características que define o carril é o seu peso próprio, já que está diretamente ligado às suas dimensões. É possível encontrar-se carris de 45 kg/m para linhas de tráfego leve, carris de 54 kg/m e 60 kg/m para linhas de tráfego pesado e ainda carris de 71 kg/m para linhas de tráfego muito pesado. Atualmente, um dos carris mais utilizado é o carril UIC60 cujas dimensões estão apresentadas na Fig. 3. Quando instalados na via, estes carris são soldados entre si, originando a barra longa soldada (BLS), uma barra com um comprimento mínimo de 300 metros. Habitualmente, utilizam-se dois tipos de soldadura para a execução destas vias sem juntas:

- Soldaduras elétricas – realizadas normalmente em estaleiro, pois requerem o uso de uma máquina de grandes dimensões e difícil transporte. Neste tipo de soldadura, os carris são submetidos a uma corrente elétrica de alta intensidade, que por contacto, provoca o aquecimento e fusão dos topos dos carris. Em seguida, quando comprimidos um contra o outro, provocam um encalque e conseqüente soldadura.
- Soldaduras aluminotérmicas - usadas normalmente para unir as barras longas previamente montadas em plena via. Para tal, é utilizada uma reação exotérmica para criar metal líquido, que chega a atingir os 3000°C, que une e repara os carris. No final, é necessário efetuar desgaste e esmerilagem na zona onde se realizou a soldadura.

As soldaduras elétricas tendem a quebrar por serem demasiado rijas e têm um custo superior face às soldaduras aluminotérmicas. Estas por sua vez, são as mais indicadas para as interdições (suspensões temporárias da circulação ferroviária).

O carril de barra longa soldada possui certas vantagens em comparação com o carril standard. Em particular, oferece uma vida útil prolongada da via, uma redução significativa na produção de ruído e vibração, e um desempenho superior em termos de estabilidade dos veículos. No entanto, é importante considerar que o carril de barra longa é mais sensível às flutuações de temperatura, o que pode levar a esforços internos significativos. Consequentemente, a manutenção e substituição dos componentes da superestrutura pode ser mais desafiadora e requerer um investimento inicial mais elevado (Fortunato, 2005).

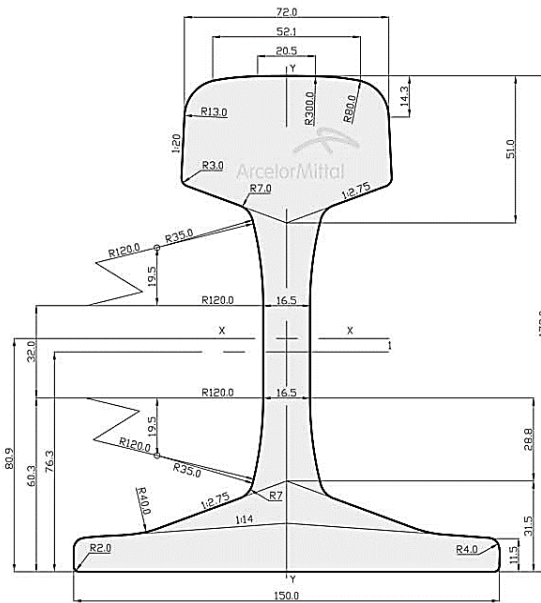


Fig. 3 - Representação de um perfil de carril UCI 60 (ArcelorMittal s.d., 2023)

2.2.2 ELEMENTOS DE FIXAÇÃO

Atualmente, as vias ferroviárias comportam veículos pesados que, por vezes, se deslocam a elevadas velocidades. Deste modo, a superestrutura da via tem de ser pesada o suficiente e ter um sistema de fixação carril/travessa robusto e flexível que permita resistir aos esforços produzidos. O tipo de ligação e as características dos elementos de ligação e de apoio estão relacionados com o tipo de travessa de cada via (Fortunato, 2005). A seleção do tipo de sistema deve ter em conta a possibilidade de os seus elementos serem fácil e rapidamente substituídos.

Em travessas de madeira utilizam-se apoios metálicos (chapins), entre os carris e as travessas (Fig. 4), assegurando assim tensões admissíveis e protegendo a madeira contra o desgaste mecânico provocado pelos esforços inerentes.



Fig. 4 - Elemento de fixação rígido (Rubinsztejn, 2011)

Em travessas de betão são colocados elementos elásticos, Fig. 5, permitindo que haja um amortecimento das vibrações provocadas pelas rodas, e conseqüente redução do atrito entre carril e travessa.



Fig. 5 - Elementos de fixação elásticos: a) sistema de fixação Pandrol; b) sistema de fixação Nabla (Fernandes, 2011)

2.2.3 TRAVESSAS

As travessas são componentes essenciais da via-férrea que têm como função principal receber e distribuir as cargas transmitidas pelos carris para a camada de balastro, garantindo que os níveis de tensão permaneçam dentro dos limites aceitáveis. Além disso, as travessas são responsáveis por sustentar o sistema de fixação dos carris e evitar movimentos indesejados em todas as direções (vertical, lateral e longitudinal). Em conjunto com os carris, as travessas ajudam a manter a distância correta entre as duas filas de carris (bitola) (Alves, 2010).

Os principais aspetos a serem considerados numa travessa são as suas dimensões, que afetam a área disponível para distribuir as tensões na camada de balastro, e o seu peso, que garante a estabilidade longitudinal e transversal da via (Pita, 2006). Outro parâmetro igualmente importante é o espaçamento entre travessas consecutivas, geralmente de 0,60 m entre os seus eixos, tanto para linhas convencionais como para linhas de alta velocidade (Fernandes, 2011).

A composição das travessas foi variando ao longo dos tempos. Primeiramente surgiram as travessas de madeira que ainda hoje são frequentemente utilizadas. As mesmas foram sendo gradualmente substituídas por travessas de betão armado e travessas metálicas. Atualmente, para além destas últimas, utilizam-se as travessas constituídas por material compósito que têm um impacto ambiental muito positivo.

As travessas de madeira, como se pode observar na Fig. 6 a), são cortadas a partir de árvores resinosas e folhosas, sendo de seguida submetidas a tratamentos de prevenção do apodrecimento. Devido à sua vida útil relativamente reduzida e também baixa resistência lateral resultante, em grande parte devido ao seu peso reduzido (principalmente importante na alta velocidade), o seu uso na Europa é restrito a linhas de pouca importância ou a situações onde as travessas de betão não são adequadas (Fortunato 2005).



Fig. 6 – Via balastrada assente em travessas de diferentes composições: a) travessas em madeira (cobblumber, 2023); b) travessas metálicas (Hidremec s.d., 2023)

As travessas metálicas, visíveis na Fig. 6 b), começaram a ser fabricadas no princípio do século XIX e foram ainda utilizadas durante um tempo considerável. Estas são normalmente fabricadas em aço laminado e têm a forma de uma caleira invertida com extremidades dobradas para melhorar o encastramento no balastro.

Apesar de serem relativamente leves, quando comparadas com as restantes, e terem uma vida útil elevada, apresentam algumas desvantagens que as tornam pouco competitivas, nomeadamente, o elevado nível de ruído, o gasto adicional de isolamento elétrico e a sua vulnerabilidade a ambientes agressivos.

As travessas de betão são as mais utilizadas na atualidade e dispõem sensivelmente das mesmas dimensões que os elementos de madeira. No entanto, quando comparadas com as travessas de madeira, os custos de produção são mais elevados, assim como as dificuldades de manuseamento.

As travessas de betão são mais resistentes, conferem uma maior resistência lateral e são mais duráveis, logo requerem uma menor conservação da via, o que é um fator vantajoso.

As travessas de betão (Fig. 7) podem ser formadas por um só bloco de betão armado pré-esforçado (monobloco – TBM) ou formadas por dois blocos de betão armado ligados por uma cantoneira metálica (bi-bloco – TBB).



Fig. 7 - Via-férrea em travessas monobloco (em cima) e bi-bloco (em baixo) (Autora, 2023)

O peso das TBM é muito superior ao das TBB o que proporciona uma grande estabilidade e resistência à via, conferindo assim a capacidade de transporte de elevadas cargas de mercadoria e a prática de altas velocidades.

As TBM geraram alguma preocupação devido ao facto de não serem pré-tensionadas, gerando-se assim um momento fletor negativo a meio vão que provocava o fendilhamento do elemento. Assim, como tentativa de solucionar este problema foram desenvolvidas as TBB. Posteriormente, quando foi introduzido o conceito de pré-esforço, as TBM voltaram a ser eleitas como as mais eficientes na construção da via-férrea.

As TBB podem conduzir a problemas de manutenção da via quando instaladas em áreas instáveis, como é o caso de fundações argilosas. Esta dificuldade deve-se em particular ao nivelamento das travessas, podendo ocorrer a quebra da cantoneira na extremidade de conexão com o bloco de betão armado, o que resulta na separação dos dois blocos.

Apresenta-se de seguida, na Fig. 8, o esquema estrutural de cada um dos tipos de travessas referidos anteriormente.

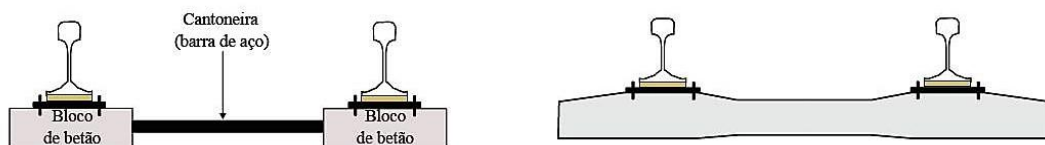


Fig. 8 - Perfil transversal de uma TBB e de uma TBM, respetivamente (IS.COM, 2021)

As travessas de material compósito, Fig. 9, podem ser constituídas por uma mistura de polietileno de alta densidade (plástico reciclado) com borracha proveniente de pneus usados, aos quais são acrescentados aditivos, nomeadamente, fibra de vidro, polímeros e produtos minerais, conferindo-lhes assim determinadas propriedades. A título de exemplo, no Quadro 1 são apresentadas percentagens dos materiais que podem ser utilizados no fabrico das travessas de material compósito.

Quadro 1 – Constituição de um tipo de travessa de material compósito (Oliveira, 2012)

Composto	(%)
Polietileno	55
Borracha	12,5
Fibra de vidro	12,5
Produtos minerais (carbonato de cálcio, micas, entre outros)	20

Estas travessas, para além da componente de sustentabilidade ambiental, apresentam diversos benefícios, nomeadamente: elevada resistência a esforços atuantes na via; elevada durabilidade, tornando a necessidade de manutenção muito reduzida ao longo de toda a sua vida útil.

Têm ainda a vantagem de ser eletricamente isoladas, resistentes aos fungos, insetos, e agentes químicos e de não requererem qualquer tipo de tratamento químico. A sua composição ajuda ainda a reduzir a emissão do ruído devido à passagem dos veículos (Evans 2006).

A desvantagem mais gravosa destas travessas de material compósito é o seu elevado custo quando comparadas com os restantes tipos de travessas.



Fig. 9 - Travessas de material compósito (Oliveira, 2012)

2.2.4 BALASTRO

Neste trabalho, o balastro é também considerado com um elemento integrante da superestrutura da via. A camada de balastro exerce um papel crucial no comportamento da via, tanto em termos de estabilidade vertical, como de estabilidade horizontal.

Normalmente, o balastro (representado na Fig. 10) é uma camada de material granular grosseiro, com espessura que varia entre 0,20 e 0,40 m. A interação entre as partículas confere à camada uma elevada resistência à compressão, sendo que a sua resistência à compressão vertical é maior do que a sua resistência lateral. Isso ocorre porque a resistência lateral depende apenas do atrito e do embricamento entre as partículas. Em parte, o balastro permite o encastramento parcial das travessas (Paixão e Fortunato 2009).

O comportamento da camada de balastro é condicionado principalmente pelas suas características mecânicas (resistência e deformabilidade) e hidráulicas (permeabilidade), as quais se devem, tanto quanto possível, manter ao longo do tempo.

A camada de balastro tem como principal incumbência o desempenho de múltiplas funções, entre as quais se destacam: (Fortunato, 2005)

- Servir de apoio às travessas;
- Resistir às ações verticais, laterais e longitudinais aplicadas às travessas, garantindo a estabilidade e o alinhamento adequado da via;
- Absorver as vibrações, promovendo o conforto;
- Permitir o escoamento de material poluente proveniente do material circulante;
- Facilitar as operações de conservação relacionadas com o nivelamento e o alinhamento da via;
- Assegurar a drenagem eficiente das águas pluviais que incidem sobre a via;
- Prevenir o crescimento indesejado de vegetação;
- Atenuar os efeitos das ações climáticas sobre as camadas subjacentes;
- Diminuir a tensão transmitida pelas travessas às camadas subjacentes.



Fig. 10 - Vagões de balastro novo (Autora, 2023)

A camada de balastro, representada nas Fig. 11 e Fig. 12, usualmente divide-se em: i) balastro entre travessas; ii) prisma lateral, que é colocado ao longo dos bordos laterais da via e que contribui para a sua resistência lateral; iii) balastro superficial, que constitui a subcamada superior que mais é afetada pelas ações mecânicas de conservação; iv) balastro de fundo, que constitui a subcamada mais profunda e que, geralmente, se apresenta mais densa e com uma granulometria menos uniforme, devido à ação do tráfego ferroviário (Fortunato 2005).

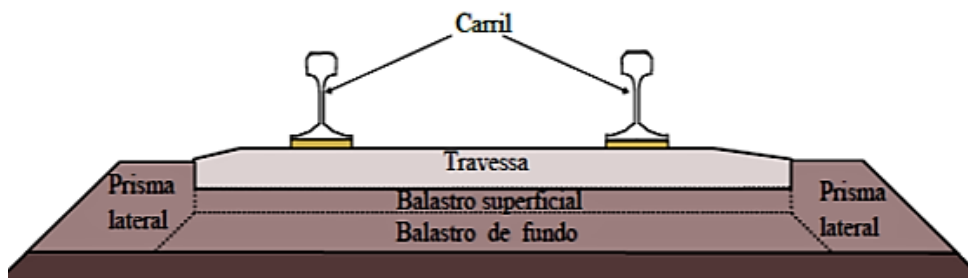


Fig. 11 - Superestrutura de uma via balastrada no sentido transversal (Vale, 2010)

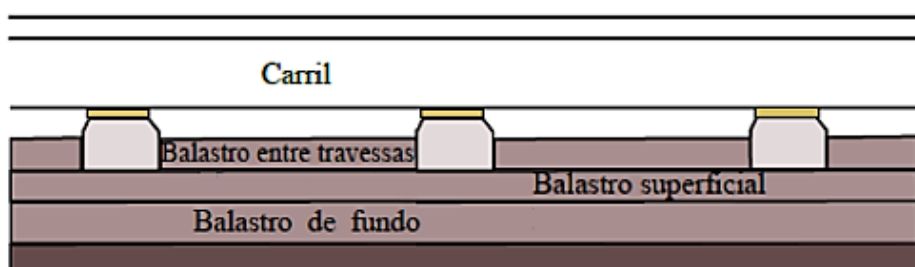


Fig. 12 - Superestrutura de uma via balastrada no sentido longitudinal (Vale, 2010)

O tráfego e a manutenção são fatores importantes que afetam a condição do balastro ao longo do tempo. O volume de tráfego, a carga das composições ferroviárias, a velocidade dos comboios e as condições climáticas afetam a compactação e a degradação do balastro. Além disso, a frequência e o tipo de manutenção, reabilitação e renovação do balastro também têm um impacto significativo na sua evolução. A falta de manutenção pode resultar em desalinhamento e degradação da camada de balastro, enquanto a manutenção excessiva pode levar à quebra acelerada das partículas.

A norma NP EN 13450, traduz os requisitos geométricos do balastro no que diz respeito à sua dimensão, granulometria, partículas finas, finos, forma e comprimento das partículas, e ainda requisitos físicos, nomeadamente, resistência ao desgaste por atrito e à fragmentação.

Em Portugal, o documento técnico IT.GEO.001 da REFER (2004), que enquadra a utilização de material para a camada de balastro, tanto na construção de novas linhas, como na conservação e na reabilitação das existentes, indica que aquele deve ser obtido exclusivamente de rochas duras e sãs, ou seja, rochas resistentes ao desgaste, ao esmagamento, ao choque e ainda à ação dos agentes atmosféricos. Entre as rochas consideradas suscetíveis de serem utilizadas como balastro encontram-se granitos, gabros, dioritos, doleritos, basaltos e quartzitos. É proibido o uso de rochas calcárias no fabrico de balastro (Moreira, 2014). Em Portugal foram adotados dois tipos de balastro, o Tipo I para sistemas ferroviários de alta velocidade e para a rede convencional, e o Tipo II apenas para a rede convencional.

No Quadro 2, apresentam-se os valores das características que permitem a aceitação, sem quaisquer restrições, e os que implicam a rejeição dos materiais a aplicar em camada de balastro.

Quadro 2 – Valores limite dos requisitos técnicos do balastro (RF.IT.VIA.015)

Características		Valores limite do balastro conforme	Valores limite do balastro não conforme	
			Aceitação condicionada	Rejeição
Los Angeles (LA) (%)	Tipo I	≤ 16	$16 < LA \leq 19$	> 19
	Tipo II	≤ 20	$20 < LA \leq 23$	> 23
Micro-Deval (MDE) (%)	Tipo I	≤ 7	$7 < MDE \leq 8$	> 8
	Tipo II	≤ 11	$11 < MDE \leq 13$	> 13
Granulometria	Peneiros (mm)	Acumulados que passam (Ac) (%)	Acumulados que passam (Ac) (%)	Acumulados que passam (Ac) (%)
	80	100	$\neq 100$	$\neq 100$
	63	100	$\neq 100$	$\neq 100$
	50	≥ 70 ≤ 99	$65 \leq Ac < 70$ e $Ac > 99$	< 65
	40	≥ 30 ≤ 65	$25 \leq Ac < 30$ e $65 < Ac \leq 70$	< 25 > 70
	31,5	≥ 1 ≤ 25	> 25 ≤ 30	> 30
	22,4	≥ 3	> 3 ≤ 8	> 8
Partículas Finas (Pf) (%)		$\leq 0,6$	$> 0,6$ $\leq 1,2$	$> 1,2$
Finos (F) (%)		$\leq 0,5$	$> 0,5$ ≤ 1	> 1
Forma das partículas	Índice de Achatamento (FI) (%)	≤ 15	> 15 ≤ 30	> 30
	Índice de forma (SI) (%)	≤ 10	> 10 ≤ 20	> 20
	Comprimento (C) (%)	≤ 4	> 4 ≤ 8	> 8
Sulfato de magnésio (MS) (%)		≤ 5	n.a.	> 5
Materiais indesejáveis (%)		0	< 3	> 6

n.a. - não se aplica

2.3 SUBESTRUTURA DA VIA-FÉRREA

2.3.1 SUB-BALASTRO

A camada de sub-balastro (Fig. 13) estabelece a transição entre o balastro e a fundação da via-férrea, e desempenha diversas funções, nomeadamente:

- Aumento da capacidade resistente da plataforma e consequente melhor distribuição das cargas transmitidas;
- Proteção contra ações de gelo;

- Evacuação das águas zenitais.



Fig. 13 - Camada de sub-balastro (Fortunato, 2014)

É necessário que o sub-balastro seja pouco suscetível à deformação (elevado módulo de deformabilidade) e exiba baixa permeabilidade. A camada de sub-balastro é geralmente composta por materiais selecionados britados de granulometria extensa. Entretanto, em algumas situações de escassez de materiais granulares de qualidade, pode optar-se por utilizar misturas betuminosas. Estas permitem a obtenção de elevados módulos de deformabilidade com espessuras inferiores, em comparação com camadas que utilizam materiais granulares convencionais. A opção de utilização destes materiais embora apresente vantagens em relação a uma melhor proteção da fundação e distribuição de cargas, normalmente é uma alternativa menos económica.

O Quadro 3 apresenta, de uma forma resumida, as exigências que os materiais de sub-balastro devem cumprir de acordo com a Instrução Técnica IT.GEO.006 da REFER (2007).

Quadro 3 - Exigências para a camada de sub-balastro segundo a IT.GEO.006 (REFER, 2007).

Propriedade	Camada de sub-balastro
Azul de metileno (MB)	$\leq 1 \text{ g/kg}$
Índice de Achatamento (FI)	< 20
Los Angeles (LA)	$\leq 25\%$
Micro-Deval (MDE)	$\leq 18\%$
LA + MDE	$\leq 40\%$
Coefficiente de permeabilidade (K)	$\leq 10^{-6} \text{ m/s}$

Ainda de acordo com esta Instrução, exige-se que o módulo de deformabilidade equivalente obtido no topo da camada de sub-balastro cumpra:

$$EV_2 \leq 120MPa \quad (1)$$

$$\frac{EV_2}{EV_1} \leq 2,2 \quad (2)$$

sendo EV_1 e EV_2 os valores do módulo de deformabilidade equivalente medidos no primeiro e no segundo ciclo de carga, respetivamente, com o ensaio de carga estática com placa.

A maneira como a camada de sub-balastro é construída é crucial para garantir que a água pluvial escoe adequadamente na via. A finalização da camada lateralmente deve ser feita sobre uma valeta de superfície ou um dreno superficial. Além disso, a inclinação da camada deve permitir que uma grande quantidade de água escoe rapidamente para fora da via, o que pode ser alcançado por uma inclinação transversal entre 4% e 5%. Isso garante uma drenagem na ordem dos 80% da água pluvial (Fortunato, 2005).

2.3.2 FUNDAÇÃO

A fundação da via, sobre a qual as camadas de apoio são construídas, é também conhecida como plataforma das terraplenagens ou simplesmente plataforma. No entanto, tecnicamente falando, esse termo deve ser reservado para se referir à superfície final da terraplenagem. A fundação da via sustenta a camada de sub-balastro e/ou de balastro e estende-se em profundidade até onde se fazem sentir as ações do tráfego (Fortunato 2005).

A fundação é constituída por solo compactado no caso de se tratar de um aterro, ou por terreno natural nas situações de escavação. Quando necessário, a parte superficial da fundação é melhorada, construindo uma camada com solos selecionados, designada de coroamento (ou leito).

Esta camada permite uma transição suave entre a camada de sub-balastro e o solo de fundação, evitando a adoção de grandes espessuras de material na camada de sub-balastro. Além disso deve constituir um elemento de proteção do solo subjacente (Mendes 2011). É usual requerer valores mínimos de compacidade para os materiais e para o módulo de deformabilidade equivalente medido no topo da camada para que esta exiba um bom desempenho.

A fundação tem um papel decisivo na qualidade e no desempenho da via, quando esta é sujeita às cargas do tráfego.

A capacidade de carga da plataforma ferroviária depende das características do terreno e das condições de drenagem da via. Uma boa plataforma não deve apresentar deformações permanentes que impeçam o regular funcionamento da estrutura. Deve possuir homogeneidade longitudinal e transversal das características físicas e mecânicas.

O CODE 719 R da UIC (2008) classifica as plataformas das terraplanagens nas classes, P1, P2 e P3, correspondentes a plataformas medíocre, média e boa, respetivamente (Quadro 4), com base nas características dos solos da fundação e da camada de leito.

Quadro 4 - Classe da capacidade de carga da plataforma (UIC, 2008)

Qualidade do solo de fundação	Classe da plataforma	Camada de coroamento	
		Qualidade do material	Espessura (m)
QS1	P1	QS1	-
	P2	QS2	0,50
	P2	QS3	0,35
	P3	QS3	0,50
QS2	P2	QS2	-
	P3	QS3	0,35
QS3	P3	QS3	-

Os solos QS1 são solos medíocres, os solos QS2 de qualidade média e os solos QS3 são de boa qualidade. A qualidade do solo (QSi) depende do tipo de solo, do seu estado hídrico e das condições hidrogeológicas e hidrológicas do local. Em termos de características mecânicas da camada de coroamento, é imposto um limite mínimo para os valores do índice CBR e do módulo de deformabilidade (E).

No Quadro 5, identificam-se os três tipos de solos referidos acima, em função da percentagem de finos, da distribuição granulométrica, da dureza das partículas, do estado hídrico e, ainda, do intervalo de valores característicos de CBR e de E.

Quadro 5 - Características dos solos para plataformas ferroviárias (Fortunato, 2005)

Qualidade do solo	Identificação	CBR (%)	E (MPa)
QS1	Solos com mais de 15% de finos, estado hídrico "médio" ou "seco"	3 a 6	15 a 25
QS2	Solos com 15% a 40% de finos, estado hídrico "seco" e boas condições hidrológicas e hidrogeológicas	6 a 20	25 a 80
	Solos com 5% a 15% de finos, estado hídrico "seco"		
QS3	Solos com menos de 15% de finos, bem graduados e com partículas de dureza elevada	> 20	> 80

3

TRATAMENTO DE PLATAFORMAS FERROVIÁRIAS

3.1 INTRODUÇÃO

A engenharia ferroviária depende significativamente do comportamento adequado do solo da fundação para garantir que as ferrovias sejam estáveis, duráveis e seguras. Se a subestrutura apresentar uma degradação significativa que não possa ser resolvida com ajustes localizados, pode ser necessário proceder a intervenções mais profundas, que podem incluir a sua reconstrução.

O processo de tratamento da plataforma em ferrovias inclui diversas etapas, nomeadamente a avaliação do solo, a escolha da técnica apropriada e a execução da obra. A avaliação do solo é feita para determinar as suas características intrínsecas e de estado, tais como resistência, deformabilidade, permeabilidade, compactidade e teor em água.

Além de garantir durabilidade e segurança das ferrovias, o tratamento da plataforma deve ter em conta questões ambientais e de sustentabilidade. Por essa razão, é essencial que as soluções adotadas sejam tanto economicamente viáveis quanto ecologicamente corretas.

3.2 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DA SUBESTRUTURA FERROVIÁRIA

A degradação da subestrutura ferroviária é um fenómeno que ocorre ao longo do tempo devido a diversos fatores e processos, associados, nomeadamente, às cargas repetidas do tráfego, efeitos climáticos, presença de água, movimentos do solo, entre outros.

3.2.1 ROTURA PROGRESSIVA POR CORTE E DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EXCESSIVA

O escoamento plástico, resultante do carregamento repetido, leva à rotura progressiva por corte (Fig. 14). Este tipo de rotura é comum em fundações compostas por solos finos, especialmente aqueles com alto teor de argila, pois o aumento do teor de humidade resulta numa rápida redução da resistência do solo.

Dependendo principalmente do movimento do solo da fundação, a rotura progressiva por corte pode resultar no levantamento do balastro entre as travessas ou no deslocamento do prisma lateral.

O levantamento do solo da fundação causa uma depressão sob a via, impactando negativamente o seu nivelamento. De forma a corrigir esta situação, é comum realizar ajustes, como adicionar balastro, o que aumenta a espessura do balastro e reduz a tensão no solo da fundação. Apesar de este

procedimento indicar uma tendência de melhoria na estabilidade, a formação de bolsadas de água sob o balastro geralmente reduz esse potencial. (Fortunato, 2005).

A rotura progressiva por corte geralmente está associada a uma deformação plástica significativa, manifestada pela componente vertical da deformação progressiva por corte e pela deformação vertical resultante da compactação e consolidação da fundação, devido à ação repetida das cargas. Esta deformação está na origem da formação de bolsadas de balastro, visível na Fig. 15.

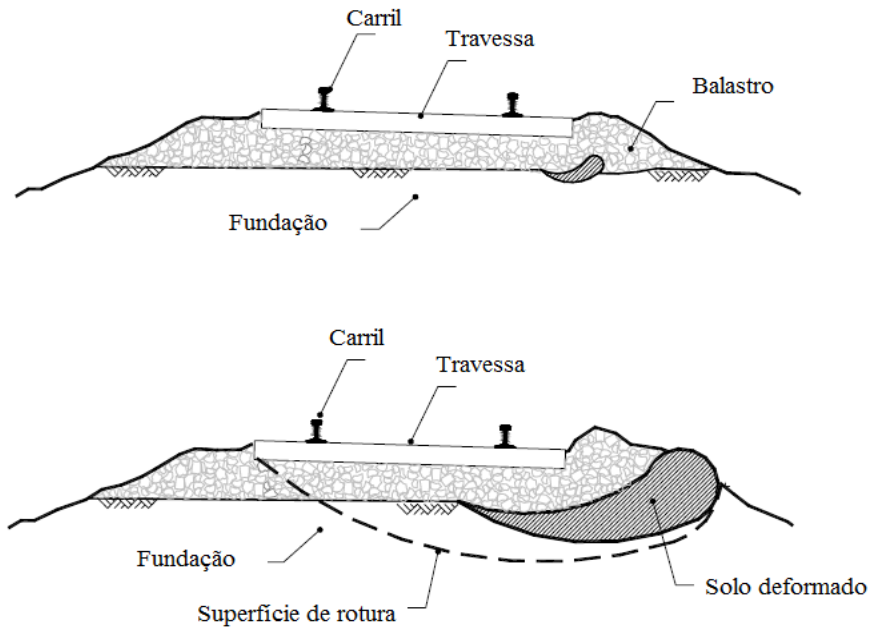


Fig. 14 – Rotura progressiva por corte (Radampola, 2006)

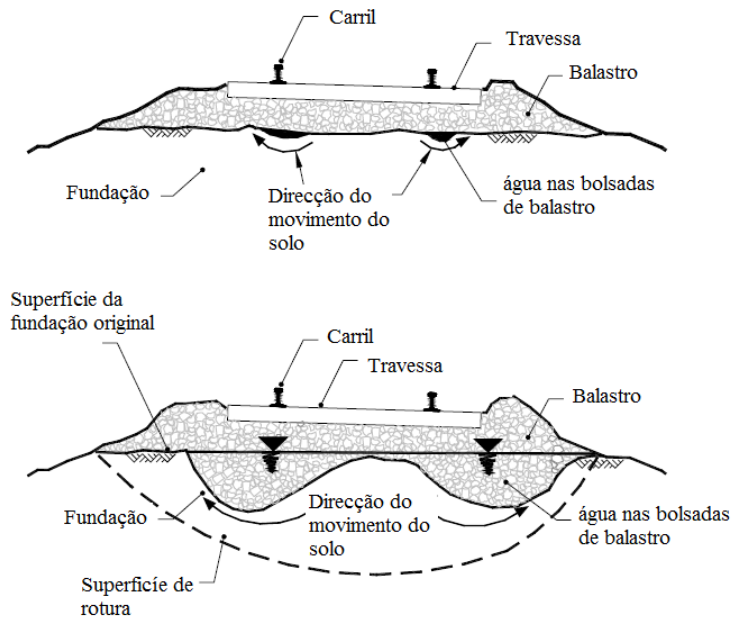


Fig. 15 – Formação de bolsadas de balastro (Radampola, 2006)

3.2.2 ROTURA GLOBAL DA FUNDAÇÃO

A rotura global por corte da fundação de uma via-férrea é um fenómeno grave que pode ocorrer quando a capacidade de carga do solo subjacente é excedida devido a forças de corte excessivas. Esta situação pode levar ao colapso estrutural da fundação e comprometer a estabilidade e segurança da via-férrea.

A rotura global por corte, visível na Fig. 16, geralmente ocorre em solos finos, como argilas, que possuem uma resistência inicial relativamente baixa. Com a aplicação repetida de cargas do tráfego ferroviário, a fundação é sujeita a tensões de corte que podem exceder a capacidade de resistência do solo. Isso resulta numa rotura progressiva, em que as camadas de solo são deslocadas umas em relação às outras, levando ao colapso da fundação.

A ocorrência da rotura global é principalmente influenciada pelas características do solo de fundação e pela geometria desta. Estes são os fatores cruciais que determinam o coeficiente de segurança em relação à possibilidade de rotura global.

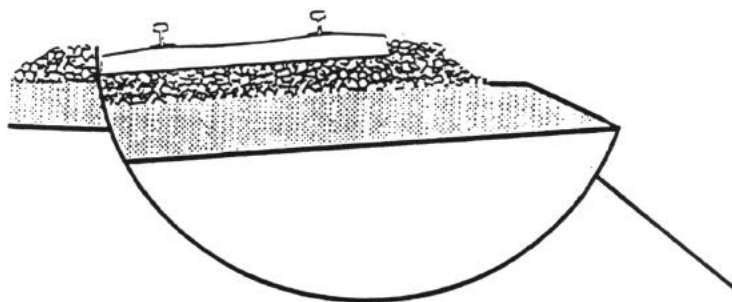


Fig. 16 – Esquema de rotura global por corte da fundação (Fortunato, 2005)

Os indícios de rotura global por corte podem ser observados através de assentamentos ou inclinação da via, deformações excessivas e desalinhamento dos carris. Este tipo de rotura é extremamente grave e pode ocorrer em diferentes momentos, como após a construção da via, durante períodos de chuvas intensas, após intervenções que alteram a geometria da via e sua fundação, ou devido a forças dinâmicas causadas por sismos.

3.2.3 DESGASTE DA PLATAFORMA E BOMBAGEM DE FINOS

O desgaste da plataforma causado pela ação do balastro resulta da combinação das cargas repetidas do tráfego, da presença de água e da suscetibilidade dos solos ao desgaste. Este tipo de problema ocorre quando o balastro assenta diretamente sobre solos finos (Fig. 17) (Fortunato, 2005).



Fig. 17 – Balastro contaminado assente sobre uma plataforma de material fino (Fortunato, 2005)

As partículas de balastro desgastam a plataforma, gerando partículas finas. A presença de água intensifica o desgaste da superfície da fundação quando se mistura com partículas de argila, formando uma lama que se desloca pelos vazios até à camada superior do balastro, contaminando-o. Quando esta lama atinge a parte inferior da travessa, os movimentos cíclicos da estrutura sobre o balastro fazem com que a lama seja bombeada pelos vazios até a superfície. Pelo facto de a lama ser bastante viscosa, há uma aderência às partículas do balastro, resultando numa redução dos espaços vazios.

Esse processo não apenas contamina o balastro, mas também causa a perda de solo da fundação, resultando em assentamentos permanentes. Uma das abordagens para prevenir esse tipo de problema é aplicar uma camada de sub-balastro adequadamente dimensionada e compactada (Moreira, 2014).

3.2.4 LIQUEFAÇÃO DOS SOLOS

A liquefação do solo de fundação refere-se à perda de resistência ao corte devido ao aumento da pressão neutra. Este fenómeno pode ocorrer em solos saturados quando estão sujeitos a vibrações causadas pelas cargas repetidas dos comboios. A liquefação do solo pode resultar numa rápida deterioração da geometria da via. Além disso, a liquefação também pode ocorrer na camada de sub-balastro caso esta tenha uma quantidade significativa de silte ou areia e caso a drenagem da água não ocorra de forma rápida e eficiente (Leite, 2017).

3.2.5 ASSENTAMENTOS POR CONSOLIDAÇÃO DE CAMADAS

Os assentamentos por consolidação de camadas são particularmente relevantes em linhas ferroviárias antigas ou em linhas que estão a sofrer processos de renovação. Existem dois motivos para isto: i) em situações em que não houve cuidado especial na escolha do traçado, os aterros foram construídos em áreas com características mecânicas desfavoráveis e não receberam tratamento adequado. Estes aterros já apresentavam assentamentos, e perante as condições operacionais surgiram assentamentos ainda mais significativos; ii) quando existe a necessidade de construir variantes para melhorar as características geométricas da linha férrea, devido ao aumento da velocidade máxima permitida. Estas variantes são construídas em áreas próximas ao traçado existente, onde é comum ocorrerem assentamentos significativos devido à consolidação do solo (Fortunato, 2005).

3.2.6 CONGELAÇÃO DOS SOLOS DEVIDO A AÇÃO DO GELO

Embora em Portugal o efeito do gelo não seja particularmente relevante no comportamento das vias-férreas, em países de clima frio essa questão é considerada uma das principais. A ação do gelo possui duas características distintas:

- Aumento de volume do solo durante o congelamento, resultando na alteração da geometria da via. Esse aumento ocorre quando o solo é suscetível à ação do gelo, há presença de água no solo e as temperaturas estão baixas;
- Amolecimento do solo durante o descongelamento, causando uma rápida deterioração da via. Neste processo, também podem ocorrer deformações plásticas significativas e a possibilidade de ocorrer rotura por corte.

Os solos que são suscetíveis à congelação são predominantemente solos finos, devido à sua granulometria que proporciona uma permeabilidade suficiente para permitir o fluxo de água e, conseqüentemente, a formação de gelo. Estes solos incluem siltes, areias siltosas e argilas de baixa plasticidade (Leite, 2017).

3.3 REFORÇO E MELHORAMENTO DO SOLO DA PLATAFORMA

Existem duas abordagens diferentes para subdividir as intervenções que visam melhorar o solo em termos de técnicas utilizadas, dependendo da metodologia aplicada:

- Reforço do solo – técnicas que se baseiam na introdução de elementos resistentes para reforçar o maciço como um todo sem grande alteração, ou até mesmo nenhuma, nas características do solo;
- Tratamento do solo – técnicas que utilizam metodologias como compactação, drenagem ou injeções para melhoramento das características resistentes e de deformabilidade do solo de fundação sem a necessidade de introduzir elementos resistentes.

3.3.1 TRATAMENTOS COM CAL AÉREA

A cal aérea (referida de seguida apenas por cal) pode ser utilizada como um produto de tratamento de solos para serem compactados em camadas. A cal a misturar com os solos pode ser utilizada de três formas: viva, hidratada (ou apagada) e leite de cal (ou leitada de cal).

A cal aérea viva é capaz de promover alterações nas características geotécnicas dos solos de forma mais rápida, sendo geralmente requeridas pequenas quantidades para alcançar objetivos específicos.

A cal aérea hidratada é frequentemente encontrada na forma pulverulenta, com uma granulometria mais fina do que a cal viva, devido ao processo de hidratação que lhe confere maior grau de finura.

O leite de cal, também conhecido como leitada, pode ser obtido tanto a partir da cal aérea hidratada quanto da cal viva. É geralmente utilizado em solos secos e muito secos, exigindo uma quantidade maior de água. Uma vantagem do leite de cal é sua capacidade de evitar a formação de poeira.

A adição de cal permite que haja um melhoramento, ou mesmo a estabilização do solo, fazendo com que as suas propriedades melhorem. A cal reage quimicamente com o solo, em particular quando existem partículas finas, alterando a sua estrutura e aumentando a sua capacidade de suporte, resistência à compressão, durabilidade e permeabilidade.

O processo de tratamento do solo com cal por via seca, conforme ilustrado na Fig. 18, envolve os seguintes passos: i) Espalhamento da cal em pó; ii) Mistura da cal com o solo; iii) Compactação inicial; iv) Reperfilamento do terreno; v) Compactação final.

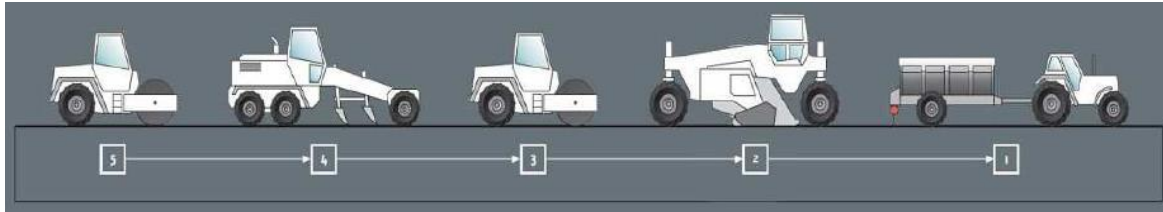


Fig. 18 – Execução da estabilização por via seca (Cruz, 2008)

O processo de tratamento do solo com cal por via húmida, conforme ilustrado na Fig. 19, envolve os seguintes passos: i) Preparação do solo e armazenamento da cal; ii) Espalhamento do leite de cal; iii) Mistura da cal com o solo; iv) Compactação inicial; v) Reperfilamento do terreno; vi) Compactação final.

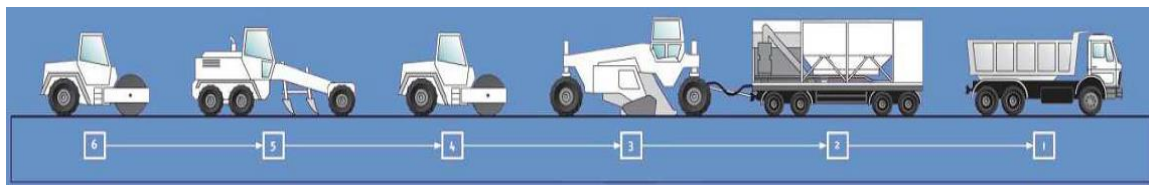


Fig. 19 – Execução da estabilização por via húmida (Cruz, 2008)

De seguida, apresentam-se, de forma genérica, as diversas fases do processo construtivo de uma camada de solo misturado com cal (solo-cal) *in situ* (Pinto, 2009):

- Preparação da superfície do solo – É necessário realizar a escarificação *in situ* para obter uma camada de solo com espessura relativamente uniforme, garantindo a ausência de partículas de grandes dimensões;
- Espalhamento da cal – A cal em pó deve ser distribuída de maneira uniforme, seguindo uma dosagem pré-determinada. Isto deve ser feito utilizando meios mecânicos equipados com doseadores volumétricos e dispositivos apropriados para controlar e reduzir a emissão de poeira;
- Mistura e homogeneização – Durante o processo de mistura, é importante obter uma distribuição uniforme da cal aplicada ao solo, o que pode ser identificado pela cor final da mistura. Para tal, os meios mecânicos utilizados estão equipados com dispositivos, que garantem uma qualidade de mistura comparável à obtida em central (Fig. 20). A mistura entre a cal e o solo não deve durar mais de uma hora, de modo a evitar a formação de grumos de cal. A compactação e o acabamento devem ser feitos logo de seguida, caso contrário, será necessário executar uma nova desagregação e mistura;
- Compactação – Após a mistura, procede-se à compactação do material até atingir a densidade pré-determinada. A densidade obtida tem influência significativa nas características de durabilidade e resistência desses materiais. Portanto, é importante controlar os equipamentos

de compactação e determinar o número de passagens necessárias para alcançar os valores desejados de densidade. O grau de compactação a obter depende das especificações de projeto e do tipo de camada a construir (LCPC/SETRA, 2000);

- Acabamento da superfície do solo – O reperfilamento deve ser executado antes da conclusão da compactação, com a ajuda de uma motoniveladora. Este processo deve ser feito de forma rápida, dentro do prazo de trabalhabilidade do material estabilizado. A superfície do solo estabilizado com cal deve seguir os perfis transversais e longitudinais do projeto, com uma margem de erro aceitável entre 0,02 e 0,025 m;
- Camada de proteção – Após a conclusão da compactação da camada de solo tratado, pode ser necessário aplicar uma proteção superficial, que pode ser apenas uma simples rega com água ou um tratamento com emulsão betuminosa, eventualmente com areia e gravilha.



Fig. 20 – Mistura de cal no terreno (Wirtgen, 2023)

3.3.2 SANEAMENTO E SUBSTITUIÇÃO DO TERRENO

Esta técnica consiste na substituição do terreno de fundação, que não apresenta as propriedades requeridas pela infraestrutura, tanto em termos de resistência, como de deformabilidade. A substituição é feita por um material, normalmente granular, com melhores características. A aplicação desta técnica é feita através de dois métodos distintos (Antunes, 2016):

- Utilização de equipamentos de escavação e terraplenagem para escavar o solo de fundação e substituí-lo por material controlado;
- Expulsão lateral do solo pelo próprio peso do aterro, que é construído rapidamente.

A técnica de substituição por escavação pode ser aplicada em quase todas as situações, desde que, nos casos em que haja solos submersos ou com baixa capacidade de sustentação, sejam incorporados elementos de contenção periférica como parte do processo.

Em determinadas circunstâncias, caso os materiais removidos após a escavação ou saneamento possuam características apropriadas para reutilização, pode ser considerada a sua reaplicação.

A expulsão do solo como método de substituição (Fig. 21) é adequada somente para solos compostos por materiais finos, como argilas, ou solos orgânicos com baixa consistência, que estão suscetíveis a comportamentos de refluxo por compressão. Essa abordagem é especialmente aplicável em áreas submersas, como regiões costeiras e margens de rios.

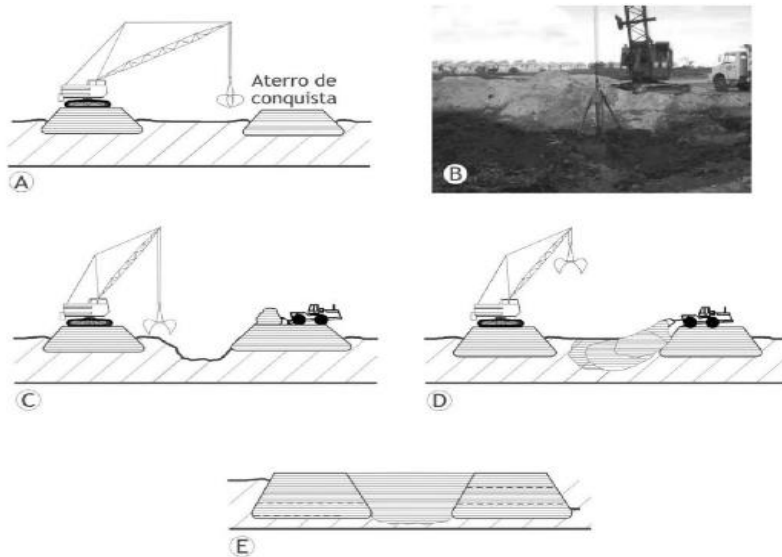


Fig. 21 – Sequência executiva de substituição de solo mole (Almeida e Marques, 2010)

No entanto, é importante ressaltar que essa técnica só é economicamente e ambientalmente viável para camadas do terreno que precisam ser substituídas com uma espessura relativamente pequena (de 3 a 4 metros).

3.3.3 DRENOS VERTICAIS

Drenos verticais são estruturas utilizadas para melhorar a drenagem de água no solo, principalmente reduzindo a distância até a camada drenante, geralmente localizada no topo e/ou base da camada a ser tratada. Essa técnica visa aumentar a velocidade de escoamento da água no solo, facilitando assim a consolidação de terrenos compressíveis. Na prática, os drenos verticais são aplicados em terrenos argilosos de baixa permeabilidade e consistência mole, visando aumentar a resistência ao corte e, conseqüentemente, a capacidade de suporte.

Os drenos verticais podem ser de areia ou drenos pré-fabricados, sendo distinta a técnica de execução.

Geralmente, os drenos executados em areia (Fig. 22) consistem em colunas com diâmetros que variam entre 150 mm e 750 mm, e o espaçamento mínimo recomendado entre eles é de 1,0 m.

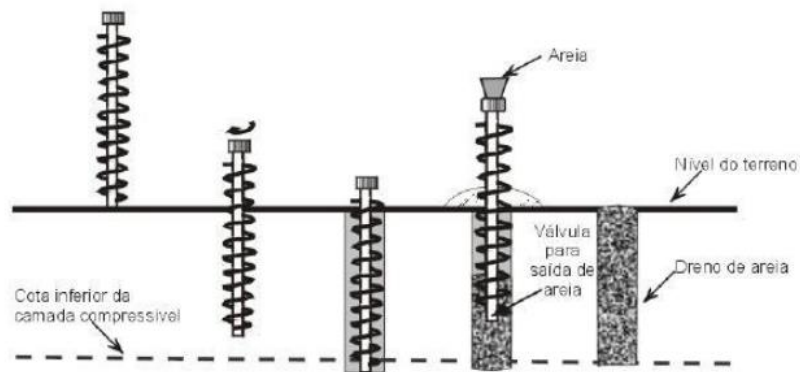


Fig. 22 – Processo de execução de drenos em areia (Antunes, 2016)

A técnica normalmente empregue na instalação de drenos com materiais granulares envolve a cravação dinâmica de um tubo fechado, resultando no deslocamento lateral de uma quantidade de material equivalente ao tubo. Esse processo, naturalmente, causa uma significativa perturbação no solo adjacente aos drenos instalados, resultando no adensamento do solo e consequente redução da sua permeabilidade.

Os drenos pré-fabricados, também conhecidos por geodrenos, Fig. 23 a), são compostos por um núcleo drenante feito de material plástico, envolvido por um filtro de geotêxtil. O objetivo do filtro é evitar que materiais finos migrem para o interior do dreno, garantindo assim o seu funcionamento adequado. Apresentam normalmente uma secção retangular com largura entre 100 e 300 mm, e espessura de 4 a 6 mm, o que é consideravelmente menor do que os drenos construídos in situ com materiais granulares.

A instalação dos geodrenos, como representado na Fig. 23 b), é feita através da colocação do geodreno dentro de uma manga com o auxílio de uma placa de ancoragem. Em seguida, a manga contendo o geodreno é posicionada no local desejado e cravada no solo, até atingir a profundidade desejada. A penetração do equipamento no solo para a instalação dos geodrenos pode ser realizada por meio da aplicação de uma força estática ou através de vibração. Na superfície do terreno, as extremidades dos drenos cravados são conectadas através de um material de drenagem geocomposto, que irá direcionar a água drenada por eles para uma área adequada.

No que diz respeito à perturbação no solo adjacente, devido à área de penetração ser significativamente menor, a perturbação é menos relevante. Consequentemente, os drenos pré-fabricados têm vindo a ser os substitutos dos drenos de areia, os quais, apesar de apresentarem boa permeabilidade, possuem pouca resistência aos movimentos da camada argilosa.



Fig. 23 – Instalação de geodrenos: a) pormenor de um dreno pré-fabricado (American Wick Drain, 2023); b) vista geral (GeoSoluções, 2023)

3.3.4 INJEÇÃO DE CALDAS DE CIMENTO POR FRACTURAÇÃO HIDRÁULICA

A técnica de injeção por fraturação hidráulica (Fig. 24) implica a criação deliberada de fraturas no solo (ou a abertura de fraturas já existentes), através da injeção de uma calda de cimento sob altas pressões. Estas fraturas são preenchidas com a calda, e o solo adjacente é compactado imediatamente.

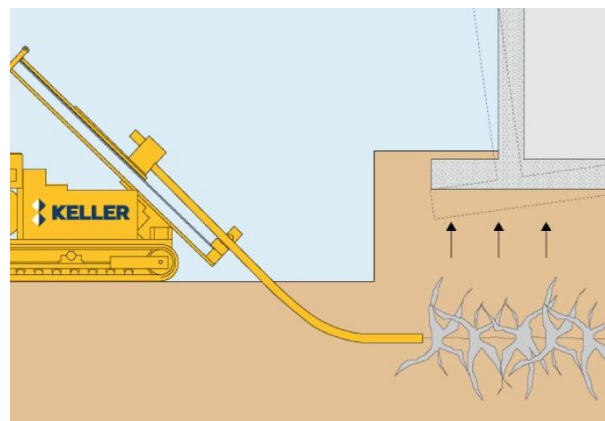


Fig. 24 – Execução de injeção por fraturação hidráulica (Keller, 2023)

As caldas utilizadas podem apresentar baixa ou alta viscosidade se forem empregues em pequenas ou grandes fissuras, respetivamente. Normalmente são adicionados adjuvantes na calda para reduzir a quantidade de água, resultando num tempo de cura mais rápido e menor intervalo entre as etapas de injeção (Rodrigues, 2018).

Esta técnica é geralmente empregue com o objetivo de compactar o solo, aumentar a sua resistência e também preencher espaços vazios, resultando na redução da permeabilidade.

Este método de intervenção tem sido particularmente utilizado em áreas onde ocorre a transição entre estruturas com diferentes níveis de rigidez, especialmente em linhas ferroviárias de alta velocidade (Fortunato, 2005).

A técnica de injeção por fracturação hidráulica é versátil e pode ser aplicada em diversos tipos de solo, mas é geralmente utilizada em solos finos. Durante a sua execução, é essencial manter um controle rigoroso para monitorizar com precisão os deslocamentos do solo, assegurando resultados satisfatórios do tratamento.

3.3.5 COMPACTAÇÃO DINÂMICA PROFUNDA

Essa técnica envolve o uso de uma grua móvel que solta um peso, em queda livre, de uma altura específica, em ciclos consecutivos, seguindo uma malha predefinida. O peso utilizado pode variar de 10 a 30 toneladas, e a altura de queda pode variar de 15 a 30 metros. Quanto ao espaçamento da malha de compactação, geralmente varia entre 2 e 6 metros.

A técnica de compactação dinâmica profunda trabalha na reorganização das partículas do solo, resultando na diminuição do volume de espaços vazios e no aumento da densidade em profundidade. A Fig. 25 ilustra o equipamento usado nesta técnica e o aspeto final da superfície do terreno depois da compactação.



Fig. 25 – Processo de execução da compactação dinâmica (Liebherr, 2023)

Subsequentemente ao uso desta técnica, é comum observar a formação de grandes cavidades no solo, resultantes da estruturação aplicada durante o tratamento. Portanto, ao finalizar os trabalhos, é necessário preencher essas cavidades com material granular e realizar a compactação e nivelamento da superfície do terreno.

Para garantir a efetividade do tratamento do solo utilizando essa técnica, é necessário que os solos possuam uma certa permeabilidade, de modo a permitir uma rápida dissipação das tensões neutras durante a compactação. Portanto, os solos que são mais adequados para esse tipo de tratamento são principalmente solos arenosos soltos ou descomprimidos, além de alguns siltes.

3.3.6 DEEP SOIL MIXING

A técnica de Deep Mixing envolve a mistura mecânica de solos de baixa qualidade com calda de cimento, resultando em colunas de mistura de solo-cimento que possuem propriedades superiores às do solo original.

A execução das colunas (Fig. 26) é realizada por meio de equipamentos de perfuração equipados com pás radiais no fundo da linha de perfuração, com a calda de cimento sendo bombeada e misturada ao solo existente. A injeção da calda de cimento pode ocorrer durante a fase de perfuração, durante a retirada do equipamento da coluna, ou em ambas as fases. O processo construtivo é fortemente influenciado pelas características do solo e pelo teor em água presente.



Fig. 26 – Colunas de Deep Soil Mixing (RAITO, Inc., 2023)

Quando os solos suscetíveis de tratamento apresentam heterogeneidade significativa, esta técnica torna-se difícil de executar, pois o estudo da mistura a ser aplicada varia de acordo com as características específicas de cada solo. A aplicação de diferentes misturas em distintas áreas pode aumentar os custos do tratamento e atrasar a execução do mesmo.

3.3.7 COMPACTAÇÃO COM EXPLOSIVOS

A compactação com explosivos, visível na Fig. 27, é um método de alteração do solo no qual a energia resultante da detonação de explosivos no subsolo gera efeitos sísmicos artificiais, levando à compactação das camadas do solo.

As cargas explosivas são colocadas em perfurações específicas, seguindo uma malha pré-determinada com base nas características do solo e no nível de compactação desejado. Essas perfurações podem ser aproveitadas para detonar várias cargas em diferentes profundidades, permitindo uma otimização do processo.



Fig. 27 – Processo de execução da compactação com explosivos (theconstructor.org, 2023)

A detonação sequencial e a vibração resultante causam inicialmente um fenómeno conhecido como liquefação do solo, em que há um aumento das pressões intersticiais. Em seguida, ocorre a reorganização das partículas do solo numa estrutura mais densa e estável em comparação com a anterior. Por outras palavras, a primeira fase da detonação quebra as ligações entre as partículas do solo, enquanto as fases subsequentes aumentam o assentamento do mesmo.

O aumento das pressões entre as partículas leva à migração da água do solo para a superfície. Para facilitar essa migração, são instalados drenos verticais, que fornecem um caminho preferencial para a água. Como resultado, após a detonação, é possível observar grandes quantidades de água atingindo a superfície por meio desses drenos.

A compactação com explosivos é uma técnica totalmente desadequada para zonas urbanas, devido às vibrações que podem causar danos nas estruturas dos edifícios vizinhos.

3.3.8 JET-GROUTING

O jet-grouting é uma técnica de melhoramento de solos, que é realizada diretamente no subsolo, sem necessidade de escavação prévia. A técnica emprega um ou mais jatos horizontais a sub-horizontais de alta velocidade (aproximadamente 250 m/s) que vão desagregar a estrutura do solo natural e misturá-lo com uma calda de cimento, criando um material com propriedades mecânicas superiores e de menor permeabilidade conhecido como "solo-cimento" (Antunes, 2016).

A técnica de jet-grouting envolve, fundamentalmente, três etapas distintas no seu processo construtivo (Fig. 28):

- Corte – A estrutura natural do solo é desagregada e as suas partículas são dispersas através da ação de um ou mais jatos horizontais de alta velocidade;
- Mistura e substituição parcial – Ocorre a substituição de uma parte das partículas do solo, enquanto a outra parte é misturada com a calda injetada;
- Cimentação – As partículas de solo são agregadas por meio da ação auto endurecedora da calda, resultando na formação de um elemento consolidado, a coluna de solo-cimento.

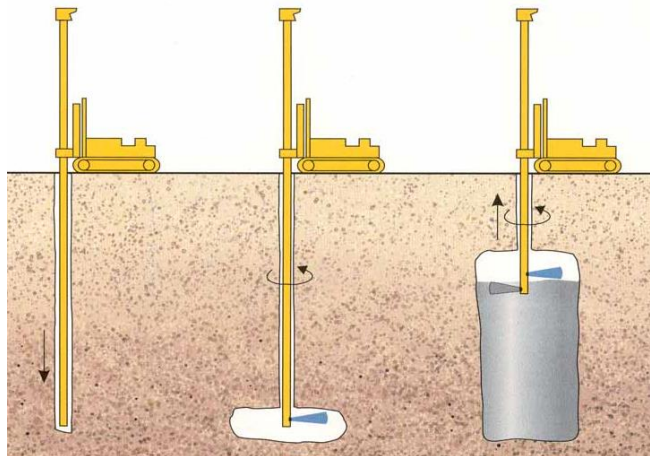


Fig. 28 – Diagrama esquemático da técnica de Jet-grouting (Hayward Baker, 2023)

Existem 3 tipos de jet-grouting (Fig. 29): monofluido (JET 1), bifluido (JET 2) e trifluido (JET 3).

No método de jet monofluido (JET 1), a calda de cimento é usada como o fluido do jato, proporcionando as três funcionalidades: corte, substituição de material e cimentação. No entanto, uma grande quantidade da energia cinética do jato é dissipada pelo atrito do solo em suspensão e o excesso de material pode tornar-se excessivamente viscoso para ser expelido livremente pelo furo.

No método de jet bifluido (JET 2), é injetado ar em conjunto com a calda de cimento. O ar auxilia no processo de substituição do solo *in situ*, atuando como "air lift". Para além disso, a injeção de ar ajuda também na desagregação do solo, aumentando o diâmetro máximo de tratamento para o mesmo tipo de terreno.

No método de jet trifluido (JET 3), a remoção do solo é realizada por meio de jatos de ar e água, independentemente da cimentação, que é aplicada por meio da injeção de calda de cimento a baixa pressão por meio do injetor localizado mais abaixo na haste de perfuração. Neste método, é necessário um sistema de perfuração de três linhas (água, ar e calda), existindo dois circuitos: o primeiro de alta pressão que é utilizado exclusivamente para o transporte de água e um segundo de baixa pressão que é utilizado para a calda de cimento.

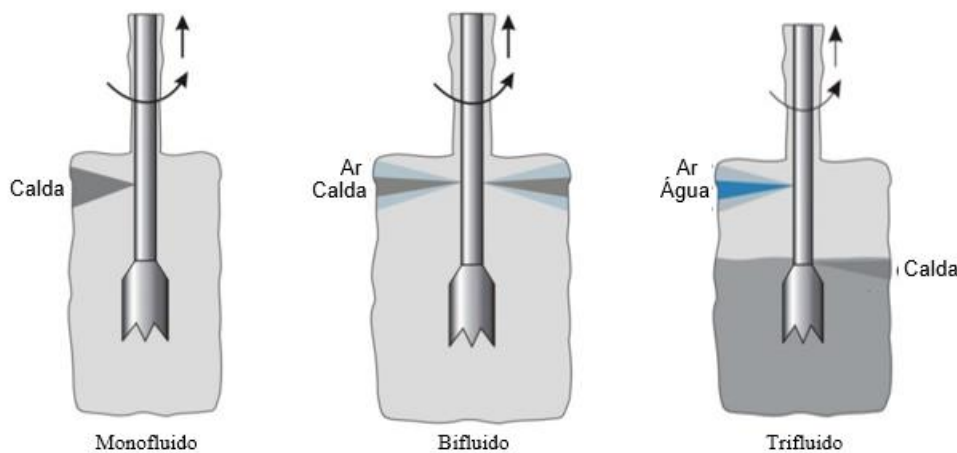


Fig. 29 – Diferentes tipos de Jet-grouting (Railssystem.net, 2023)

3.3.9 COLUNAS DE BRITA

A execução de colunas de brita consiste, em função do método utilizado, na substituição total ou parcial do terreno a tratar por uma coluna de material britado. A aplicação desta técnica tem como principal função a introdução de elementos “rígidos” e drenantes no terreno, o que lhe confere, por um lado melhores características globais de resistência e de deformabilidade, e por outro uma aceleração da consolidação do terreno face à redução da distância de drenagem da água e respetivo alívio das pressões intersticiais, para além de que ocorre durante o processo construtivo uma densificação horizontal, por deslocamento, induzido pelo movimento ascendente e descendente do torpedo vibrador.

A técnica de execução de colunas de brita envolve a inserção de uma coluna de material britado no terreno a ser tratado, podendo substituir total ou parcialmente o solo original. Com a introdução de elementos rígidos e drenantes no solo, há um melhoramento da sua resistência e deformabilidade. Além disso, a distância de drenagem da água é reduzida, aliviando as pressões intersticiais e acelerando a consolidação do solo.

A vibrosubstituição, apresentada na Fig. 30, é o método mais utilizado na execução de colunas de brita, devido à sua eficiência na densificação do solo circundante à coluna e rapidez na execução.

A vibrosubstituição envolve a introdução de uma sonda com um vibrador de baixa frequência no solo natural, com ou sem a ajuda de um fluido de injeção, geralmente água. Quando a água é usada como fluido injetado a alta pressão, o método é chamado de "wet process". Se a perfuração for assistida por ar, o método é chamado de "dry process".



Fig. 30 – Execução de colunas de brita com recurso à vibrosubstituição (TERRATEST, 2023)

É importante mencionar que, de modo distinto do processo de vibrocompactação, a coluna produzida consiste inteiramente em material britado. Isso ocorre porque o vibrador é utilizado para afastar lateralmente o solo, criando assim uma cavidade cilíndrica na qual a brita é colocada. Depois de ser inserida, a brita é compactada usando o vibrador.

3.3.10 GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos são materiais termoplásticos usados na construção civil, geralmente fornecidos em forma de rolos com larguras e extensões de vários metros. São de muito fácil instalação e têm uma elevada resistência a fatores climáticos e ambientais. O uso desses materiais é benéfico e economicamente vantajoso para o reforço da subestrutura ferroviária, especialmente quando o solo de fundação é de baixa qualidade ou a substituição por agregados de qualidade em grandes espessuras é pouco viável economicamente.

Os geossintéticos tornaram-se uma aplicação comum em obras ferroviárias, quer em casos de reabilitação, quer de construção nova. O seu uso não se limita ao reforço, podendo exercer diversas funções, nomeadamente: i) drenagem, promovendo a evacuação da água dos solos; ii) filtragem, evitando o arrastamento de partículas; iii) separação, impedindo a mistura de materiais; iv) proteção entre materiais de resistências distintas (Quaresma, 1992).

Os geotêxteis, visíveis na Fig. 31 a), têm um papel crucial na separação das camadas. Quando colocados entre dois solos com características geotécnicas diferentes, impedem a mistura ou interpenetração das partículas dos dois solos.

Quando os solos de fundação apresentam características geotécnicas consideradas fracas, a inclusão de geogrelhas, Fig. 31 b), pode aumentar a capacidade de carga aparente da fundação sem a necessidade de construir camadas muito espessas de sub-balastro. As geocélulas, Fig. 31 c), são também uma alternativa quando se pretende aumentar significativamente a resistência.

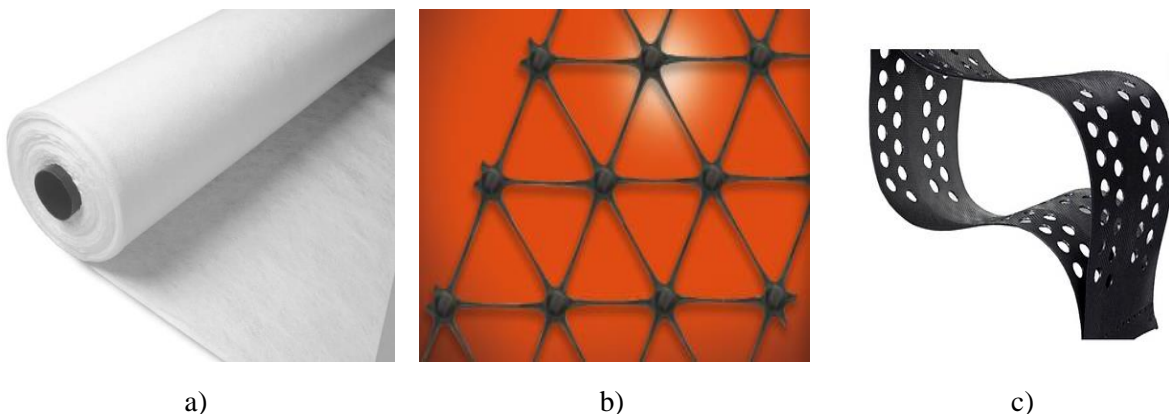


Fig. 31 – Diferentes tipos de geossintéticos: a) manta geotêxtil; b) geogrelha triaxial (Sotecnisol, 2023); c) geocélula (geosoluções, 2023)

Dos inúmeros benefícios gerados pelos geossintéticos, destacam-se os seguintes:

- Diminuição dos assentamentos na camada de balastro associados ao espalhamento lateral;
- Redução da taxa de deformações permanentes geradas devido ao carregamento cíclico;
- Aumento da capacidade de carga do sistema.

O reforço com geossintéticos pode e deve ser usado em conjunto com outras técnicas de melhoramento do solo, como a compactação ou a estabilização química, para obter resultados ainda mais eficazes e duráveis.

3.4 PEGADA DE CARBONO ASSOCIADA À VIA-FÉRREA

Segundo Wiedmann e Minx (2008), a pegada de carbono é uma medida da quantidade total de emissões de dióxido de carbono, exclusivamente causada direta ou indiretamente por uma atividade, ou acumulada ao longo do ciclo de vida de um produto.

O resultado, expresso em unidades dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq), corresponde à medida de todos os gases com efeito de estufa (GEE) emitidos e mencionados no Protocolo de Quioto, nomeadamente: o dióxido de carbono (CO₂); o metano (CH₄); o óxido nitroso (N₂O); os hidrofluorcarbonetos (HFC's); os perfluorcarbonetos (PFC's); e o hexafluoreto de enxofre (SF₆). Com o crescente impacto das atividades humanas no meio ambiente, a pegada de carbono tornou-se um indicador de elevada importância para avaliar a sustentabilidade de atividades e entidades.

De facto, existem três tipos de indicadores de sustentabilidade que abrangem aspetos económicos, sociais e ambientais, conforme ilustrado no Quadro 6.

Quadro 6 – Indicadores de sustentabilidade (Agência Portuguesa do Ambiente, 2010)

Indicadores Económicos	Indicadores Ambientais	Indicadores Sociais
<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de energia; • Consumo de materiais; • Produtividade 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de água; • Emissão de GEE; • Gestão dos resíduos 	<ul style="list-style-type: none"> • Evolução populacional; • Formação dos colaboradores

Os indicadores de sustentabilidade desempenham um papel fundamental na medição do progresso das organizações em termos económicos, sociais e ambientais. A pegada de carbono é um desses indicadores que oferece uma visão abrangente (Wiedmann, 2009).

O objetivo da medição da pegada de carbono é identificar as fontes de GEE e implementar estratégias ambientais para reduzir essas emissões. Isso pode incluir a adoção de práticas mais sustentáveis, como a utilização de fontes de energia renovável, eficiência energética, mudanças nos hábitos de consumo, entre outras medidas. É uma ferramenta importante para empresas, governos e pessoas pois através da avaliação do seu impacto ambiental, é possível trabalhar em direção a um futuro mais sustentável.

Relativamente à via-férrea, a pegada de carbono refere-se à quantidade de emissões de GEE gerados pela construção, manutenção e operação de sistemas ferroviários, incluindo material circulante e infraestruturas de apoio.

Na via-férrea, a pegada de carbono é geralmente menor em comparação com outros modos de transporte, como o rodoviário e o aéreo, devido à eficiência energética da tração elétrica e à capacidade de transportar grandes quantidades de passageiros e carga com custos reduzidos. Além disso, a eletricidade utilizada no material circulante pode ser gerada por fontes renováveis, o que reduz ainda mais a pegada de carbono.

No entanto, esta pegada pode ser significativa em alguns casos, como quando são utilizados comboios movidos a diesel ou quando a eletricidade utilizada é gerada a partir de fontes fósseis. Nesses casos, as emissões podem ser reduzidas por meio de tecnologias mais eficientes e pela transição para fontes de energia renováveis.

3.5 CATEGORIZAÇÃO DE CUSTOS NOS DIVERSOS TRATAMENTOS

Um custo pode ser classificado de acordo com diferentes características, como a sua variabilidade, forma de imputação e função.

Quanto à variabilidade, os custos podem ser classificados como custos fixos ou custos variáveis.

Os custos fixos são aqueles que não variam em relação à quantidade de produção. Isso significa que eles permanecem inalterados, independentemente do aumento ou diminuição do nível de atividade de uma empresa. Um exemplo claro deste conceito são os salários dos funcionários administrativos, pois, independentemente da quantidade de produção, o custo relacionado com eles permanece constante (Silva, 2016).

Os custos variáveis estão diretamente relacionados com a quantidade produzida por uma empresa. Estes são calculados multiplicando a quantidade utilizada da variável em questão pelo seu custo unitário (Housh & Cai, 2015). Um exemplo comum de custo variável é a energia elétrica. Isto ocorre porque quanto maior for a atividade da empresa, maior será o consumo de energia, resultando assim num aumento proporcional dos custos.

No que diz respeito à forma de imputação, estes podem ser considerados como custos de imputação direta e custos de imputação indireta. À semelhança da classificação segundo a variabilidade, o somatório destes dois custos tem de ser igual ao custo total do produto.

Conforme o nome sugere, os custos diretos são aqueles que estão diretamente relacionados com o produto. Sob outra perspectiva, são os custos associados aos recursos utilizados de forma direta na produção de um determinado produto ou serviço. A título exemplificativo tem-se a mão de obra atuante na produção e os materiais consumidos durante todo o seu processo.

Por outro lado, os custos indiretos estão associados a recursos que não têm um papel direto na criação do produto. Os custos de equipamentos utilizados na produção de vários produtos são um exemplo claro de custos indiretos.

Finalmente, quanto à função, os custos podem ser classificados em cinco categorias: custos de aquisição, custos de produção, custos administrativos, custos financeiros e custos de distribuição ou comerciais. Os dois primeiros (custos de aquisição e custos de produção) podem ser considerados custos industriais, pois estão diretamente relacionados com a conceção do produto. Os custos administrativos referem-se aos recursos utilizados na gestão da empresa, incluindo salários e encargos do pessoal administrativo ou despesas com material de escritório. Os custos financeiros estão relacionados aos custos associados ao financiamento da empresa, como juros de empréstimos bancários. Por fim, os custos de distribuição estão ligados aos recursos que a empresa disponibiliza para colocar os seus produtos no mercado, como custos logísticos e comissões de vendas (Silva, 2016).

3.5.1 PESSOAL

Os custos relacionados com a mão de obra abrangem os salários, encargos sociais, despesas de deslocação, ajudas de custo e outros custos associados aos trabalhadores que estão diretamente envolvidos na execução de uma determinada atividade. No cálculo dos custos unitários, é essencial ter conhecimento da produtividade (ou rendimento) da mão de obra, bem como da composição dos recursos envolvidos na atividade em questão. O custo unitário da mão de obra é determinado com base na produtividade (ou rendimento) e no custo por hora de trabalho. A produtividade representa a relação entre a quantidade de serviço realizada e o tempo necessário para concluí-lo. Por outro lado, o rendimento varia inversamente em relação à produtividade e é definido como a quantidade de tempo de trabalho necessária para realizar uma unidade de medição.

3.5.2 COMPRAS/MATERIAIS

A determinação das quantidades de materiais segue uma abordagem semelhante à determinação dos rendimentos da mão-de-obra, levando em consideração as perdas e desperdícios. Embora esses custos de materiais não sejam incorporados diretamente no produto, eles são indispensáveis para a produção da obra. A determinação das quantidades de materiais é baseada na medição dos trabalhos, e geralmente são aplicados coeficientes de majoração que representam a quantidade estimada de perdas e desperdícios.

Os preços unitários dos materiais são obtidos através de consultas a fornecedores, distribuidores ou fabricantes, que fornecem cotações específicas para cada unidade de medida do material. O preço base dos materiais deve incluir o imposto IVA, quando não dedutível, e, possivelmente, o custo de transporte. O custo dos materiais por unidade de medida numa operação de construção é calculado somando-se os custos de todos os materiais necessários para a sua execução.

Em resumo, o consumo unitário de materiais pode ser considerado como a soma de uma quantidade teoricamente necessária com uma quantidade adicional denominada perda, que é parte evitável e parte inevitável, normalmente associada aos processos de execução. Assim como acontece com a mão-de-obra, existem fatores que afetam o consumo de materiais, aumentando-o ou diminuindo-o, dependendo da situação.

3.5.3 EQUIPAMENTOS

Os custos dos equipamentos podem representar uma parte significativa dos gastos totais de uma obra. Ao considerar a aquisição dos equipamentos necessários, é importante ter em conta os custos envolvidos. Os preços dos equipamentos variam de acordo com fatores como tipo, marca, tamanho, idade, condição e recursos específicos de cada um. Geralmente, equipamentos mais avançados e especializados tendem a ser mais caros.

Em muitas situações, pode ser mais viável e económico alugar os equipamentos necessários em vez de comprá-los. O custo do aluguer é normalmente calculado com base no tempo de uso do equipamento, com cobrança por hora, dia, semana ou mês. Esta opção permite ajustar os custos de acordo com a duração da obra e evitar gastos excessivos com aquisições permanentes de equipamentos.

3.5.4 SUBEMPREITADAS

O contrato de subempreitada desempenha um papel fundamental e é amplamente utilizado na indústria da construção civil, tanto em projetos privados quanto em obras públicas. Este estabelece uma relação contratual entre o empreiteiro principal e o subempreiteiro. No processo de elaboração do orçamento, é importante antecipar quais subempreitadas serão necessárias para os trabalhos a serem realizados e, sempre que possível, solicitar cotações dessas subempreitadas. Assim, o orçamento torna-se mais realista e serve como base durante a execução da obra.

As subempreitadas contratadas são geralmente para fornecimento de mão-de-obra, materiais, equipamentos, manutenção, entre outros. Assim, os custos que as envolvem resultam do processo de produção, pelo que deverão ser parte integrante dos custos diretos.

As subempreitadas geralmente são contratadas para fornecer mão de obra, materiais, equipamentos, serviços de manutenção, entre outros. Consequentemente, os custos associados a essas subempreitadas são considerados uma parte integrante do processo de produção e devem ser incorporados nos custos diretos.

3.5.5 CUSTOS DE ESTALEIRO

Os custos de estaleiro referem-se a gastos específicos associados a uma obra em particular, que não podem ser atribuídos às tarefas do orçamento. Estes custos incluem despesas como eletricidade, água, vias de acesso temporárias, vedações, equipamentos não incluídos nos custos diretos, entre outros (Faria, 2014).

3.5.6 ENCARGOS DE ESTRUTURA

Geralmente, essas despesas são incluídas no cálculo do preço de venda, utilizando-se um percentual em relação à meta de receita da empresa, de modo a distribuir os custos operacionais em diversos projetos que a empresa possui em cada momento.

É essencial incluir no processo de orçamentação uma margem que abranja os encargos de estrutura da organização. Esta margem pode ser considerada como a contribuição de cada projeto para a amortização dos custos operacionais da empresa. Vale ressaltar que, embora seja um valor de referência fixado para o ano todo, nem sempre a mesma margem é aplicada a todos os projetos, pois sua aplicação depende da estratégia comercial adotada pela empresa (Silva, 2016).

4

CASO DE ESTUDO

4.1 ENQUADRAMENTO

A obra escolhida para análise no âmbito desta dissertação diz respeito aos trabalhos de “Modernização da Linha da Beira Alta no troço Guarda – Vilar Formoso”. Por decisão do dono de obra, este projeto foi dividido em dois subtroços, designados por:

- Subtroço Guarda / Cerdeira – Início ao pk 209+425, após aproximadamente 2,7 km da Estação da Guarda e a 140 m da futura concordância com a Linha da Beira Baixa e término ao pk 223+564, cerca de 2 200 m antes do AMV de entrada da Estação de Cerdeira;
- Subtroço Cerdeira / Vilar Formoso – Início ao pk 223+564 e término ao pk 252,223, após a Estação de Vilar Formoso (fronteira com Espanha).

O subtroço Cerdeira – Vilar Formoso, no qual o estudo foi realizado, desenvolve-se entre o km 223+537 e o km 252+091, conforme se pode observar na Fig. 32, numa extensão aproximada de 34 km, atravessando os concelhos da Guarda, Sabugal e Almeida.

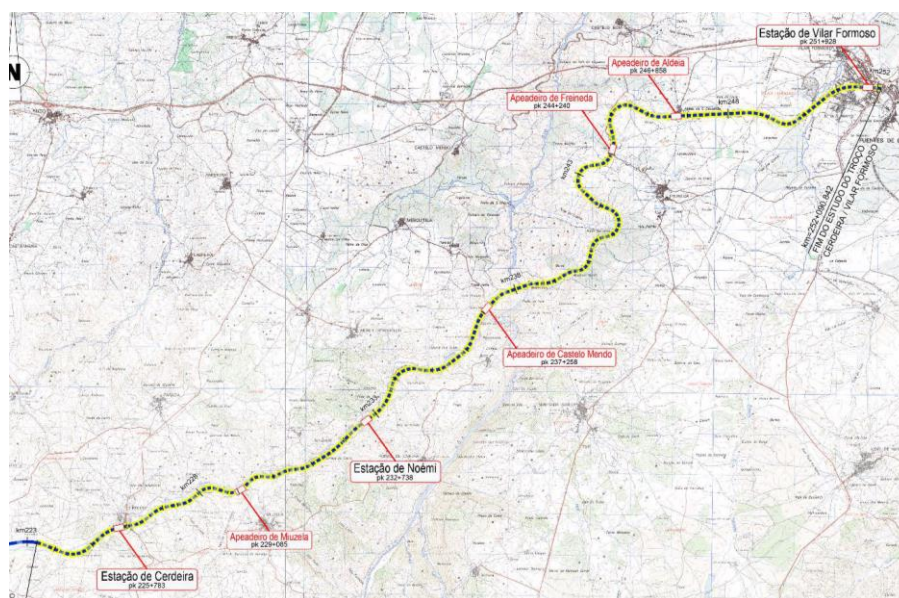


Fig. 32 – Localização do subtroço Cerdeira/Vilar Formoso (Conduril, 2020)

A intervenção atual neste subtroço que suporta tráfego misto de diferentes características e material circulante convencional (passageiros e mercadorias), pretende melhorar as condições de exploração ferroviária e reduzir os custos de manutenção da infraestrutura. Isto é alcançado por meio dos seguintes objetivos:

- Melhorar as condições de segurança e aumentar os índices de conforto;
- Assegurar a fiabilidade e continuidade da exploração ferroviária;
- Iniciar um novo ciclo de vida útil da infraestrutura.

4.2 IDENTIFICAÇÃO DAS ZONAS A TRATAR

O projeto sobre o qual este estudo incide foi fundamentado nas observações realizadas durante o reconhecimento geológico de superfície, nos resultados obtidos nos poços de auscultação da plataforma de via (PAV) e nos ensaios neles realizados, bem como no índice de qualidade de via (QN) disponibilizado pela Infraestruturas de Portugal (IP).

A partir da análise global desses elementos, pode-se concluir que a plataforma deste subtroço possui predominantemente uma classificação P3, indicando boa qualidade de acordo com as recomendações do CODE 719 R da UIC (2008). No entanto, ao longo do traçado, foram identificados alguns trechos de extensão significativa nos quais a qualidade da plataforma é classificada como P2, razoável, ou P1, medíocre. Para obter uma avaliação mais precisa das necessidades reais de melhoria na camada de coroamento, optou-se por diferenciar a classe P2 em P2+ e P2-, levando em consideração os módulos de deformabilidade alcançados e as condições hidrológicas e hidrogeológicas existentes.

Desta forma, a classe de plataforma P2+ é atribuída às áreas em que os solos presentes na camada de coroamento se enquadram na classe QS2 (UIC, 2008), com potencial para melhorar a sua classificação devido às condições hidrológicas aprimoradas, além de apresentarem um módulo de deformabilidade igual ou superior a cerca de 80 MPa.

A classe de plataforma do tipo P2- refere-se às zonas onde os solos existentes ao nível da camada de coroamento se enquadram na classe QS2 (UIC, 2008), sem possibilidade de melhoria da sua classificação em virtude do melhoramento das condições hídricas. Englobou-se ainda nesta classe de plataforma as zonas onde o material existente é das classes QS3 ou QS2 com possibilidade de melhoria da sua classificação em virtude do melhoramento das condições hídricas, mas, contudo, os valores do módulo de deformabilidade que os materiais apresentam são inferiores a 80 MPa.

As intervenções ao nível da plataforma ocorrerão ao longo de um trecho de 3520 m, entre o km 231,957 e o km 240,316, como apresentado no Quadro 7. Estas obras serão executadas com o tráfego ferroviário em circulação.

Quadro 7 – Troços alvo de tratamento de plataforma (Conduril, 2019)

km inicial	km final	Extensão (m)	Classe da Plataforma (UIC, 2008)
231,957	232,781	110	P2+
232,781	232,981	200	P1
235,175	235,897	722	P1
236,342	236,528	186	P2-
237,447	237,616	169	P1
238,291	238,52	229	P2-
239,509	239,829	317	P1
239,966	240,316	350	P2-
240,796	241,044	248	P2-
242,47	243,459	989	P1

4.3 SOLUÇÕES DE TRATAMENTO ADOTADAS

Relativamente às intervenções feitas ao nível da subestrutura, foram admitidas três soluções possíveis de tratamento de plataforma.

A solução 1 refere-se a zonas onde está prevista apenas a colocação da camada de sub-balastro. Inicia-se a escavação até à camada de coroamento, como se pode ver na Fig. 33 a), e mede-se o teor de água presente nos solos. Caso estes apresentem o teor em água próximo do ótimo ($\pm 2\%$), procede-se à compactação da camada e efetua-se o ensaio de carga com placa (ECP) para garantir que $EV_2 \geq 80\text{MPa}$. Por fim, executa-se a camada de sub-balastro com agregados britados de granulometria extensa (ABGE) de 0,15 m de espessura, procede-se à sua compactação (Fig. 33 b)) e efetua-se o ECP, garantindo que $EV_2 \geq 120\text{MPa}$.



a)



b)

Fig. 33 – Execução da solução 1: a) escavação até ao nível da camada de coroamento; b) compactação da camada de sub-balastro (Conduril, 2022)

A Solução 2 refere-se a zonas onde está previsto a colocação da camada de sub-balastro e da camada de coroamento. Inicia-se a escavação, visível na Fig. 34 a), desta vez até ao topo da fundação e mede-se o teor de água presente nos solos. Caso estes apresentem o teor em água próximo do ótimo, procede-se à compactação da camada e efetua-se o ECP para garantir que $EV_2 \geq 60\text{MPa}$. De seguida, executa-se a camada de coroamento de 0,35 m de ABGE (duas subcamadas de 0,15 m e 0,20 m), procede-se à sua compactação (Fig. 34 b)) e efetua-se novamente o ECP de modo a garantir que $EV_2 \geq 80\text{MPa}$. Por fim, executa-se a camada de sub-balastro de 0,15 m de ABGE e efetua-se o ECP, garantindo que $EV_2 \geq 120\text{MPa}$.



a)



b)

Fig. 34 – Execução da solução 2: a) Início do processo de escavação; b) compactação da camada de coroamento (Conduril, 2022)

A Solução 3 refere-se a zonas onde está previsto a colocação da camada de sub-balastro, da camada de coroamento e ainda a introdução de rachão envolto em geotêxtil. Quando após a escavação para execução da camada de sub-balastro, se detem solos com deficientes características geotécnicas e teor de água superior ao ótimo, já não se procede à realização do ECP nesse nível (o qual, presumivelmente, daria um valor do módulo inferior ao estabelecido) e avança-se desde logo para a escavação de mais 0,65 m, visível na Fig. 35 a) (para acomodar as camadas de rachão e ABGE). De seguida, colocam-se 0,30 m de rachão envolto em geotêxtil (Fig. 35 b)), sendo que os vazios do topo desta camada são preenchidos com balastro limpo.



Fig. 35 – Processo de colocação do geotêxtil e do rachão: a) escavação até à cota necessária para colocação do geotêxtil; b) preenchimento da camada de rachão (Conduril, 2022)

Posteriormente, executa-se a camada de coroamento de 0,35 m de ABGE, como é apresentado na Fig. 36, (duas subcamadas de 0,15 m e 0,20 m) e efetua-se o ECP de modo a garantir que $EV_2 \geq 80\text{MPa}$. Por fim, executa-se a camada de sub-balastro de 0,15 m de ABGE e efetua-se o ECP, garantindo que $EV_2 \geq 120\text{MPa}$.



Fig. 36 – Execução da camada de coroamento (Conduril, 2022)

Nestas soluções optou-se por construir a camada de coroamento com ABGE, em alternativa a construir com solos de classe QS3 devido à facilidade de obtenção desses materiais em pedreiras e de controlo da sua qualidade.

No final do tratamento da subestrutura, é colocado o novo balastro, visível na Fig. 37, e montado novamente o carril com as respetivas travessas.



Fig. 37 – Colocação do novo balastro (Conduril, 2022)

Nas plataformas de classe P2+, foi executada maioritariamente a solução 1, visto que a qualidade é razoável. Nas plataformas de classe P2-, foi executada tanto a solução 2 como a solução 3. Nas plataformas de classe P1, como a qualidade é medíocre, foi executada sempre a solução 3, à exceção de um troço onde foram postas em prática as três soluções.

4.4 CONDICIONANTES ENCONTRADAS NA OBRA

4.4.1 ACESSIBILIDADES

A acessibilidade dos caminhos de acesso para os equipamentos é fundamental para garantir a eficiência e a segurança da obra.

É essencial avaliar as necessidades dos equipamentos utilizados na obra e planejar o seu fluxo de forma eficiente, nomeadamente o número mais adequado de entradas e saídas existentes por frente de obra, de modo a promover uma melhor produtividade.

Em alguns troços alvo de tratamento de plataforma, foi necessário adaptar os caminhos de acesso existentes para atender às necessidades dos equipamentos. Como se pode ver na Fig. 38, houve a necessidade de fazer a desmatação e limpeza dos terrenos.

Quando os caminhos de acesso existentes não são adequados, pode ser necessária a criação de novos caminhos para atender às exigências da obra. Isto pode envolver a construção de estradas temporárias, pontes, rampas ou aterros para permitir a movimentação dos equipamentos.

Ao criar ou adaptar os caminhos de acesso dos equipamentos, é fundamental garantir a conformidade com as regulamentações e normas de acessibilidade locais. Isso pode incluir requisitos específicos de largura, inclinação, sinalização e outros critérios relevantes.



Fig. 38 – Criação de acessibilidades à obra: a) Terreno inicial antes da abertura do acesso b) Terreno acessível à passagem de equipamentos (Conduril, 2021)

4.4.2 PERÍODO NOTURNO/ PERÍODO DIURNO

Geralmente, os trabalhos noturnos envolvem uma remuneração adicional, como horas extras ou adicional noturno, o que pode aumentar significativamente os custos. No caso da obra em estudo, os tratamentos de plataforma são realizados sempre no período noturno, o que acarreta um custo adicional à obra.

A iluminação adequada é um fator essencial durante o trabalho noturno, especialmente em áreas onde a iluminação natural pode ser limitada. O custo de iluminação artificial, como torres de iluminação (Fig. 39), pode ser adicionado aos custos da obra noturna.

A execução de uma obra durante a noite apresenta também desafios logísticos significativos, pois requer a garantia de disponibilidade de transporte para os trabalhadores e de suprimentos durante esse período.



Fig. 39 – Torres de iluminação (Conduril, 2022)

4.4.3 DISTÂNCIA DA PEDREIRA

Quanto maior a distância entre a pedreira e o local da obra, maior será o custo de transporte dos materiais extraídos da pedreira. O transporte envolve o uso de caminhões, equipamentos de carga e combustível, o que pode aumentar os custos gerais da obra. Durante os tratamentos de plataforma realizados neste projeto, a pedreira estava localizada a aproximadamente 30 km de distância. Considerando uma velocidade média de 30 km/h para os caminhões, isto implica uma hora de viagem para recolha do material necessário e outra hora para o retorno à obra, o que afeta significativamente o rendimento e pode causar atrasos no cronograma da obra.

Em alguns casos, se a pedreira mais próxima não tiver os materiais necessários, pode ser necessário procurar alternativas mais distantes, o que provoca também o aumento do tempo e dos custos.

4.4.4 ÁREA PARA EXECUÇÃO DE STOCKS

As áreas destinadas ao armazenamento de materiais são dimensionadas de acordo com a natureza e as quantidades de materiais ou equipamentos a guardar, devendo prever-se zonas fechadas e cobertas para produtos sensíveis aos agentes atmosféricos. Os materiais que não são suscetíveis de deterioração, como é o caso dos agregados, podem ser colocados ao ar livre, havendo, no entanto, que fazer um estudo prévio para assim se disponibilizarem as áreas de depósito.

As áreas de stocks (Fig. 40) devem ser localizadas estrategicamente tendo em consideração a acessibilidade, proximidade das frentes de obra e a otimização dos fluxos de materiais. É importante que essas áreas sejam facilmente acessíveis para a movimentação de materiais, tanto para recebimento quanto para distribuição.

Na presente obra, esta condicionante é bastante relevante visto que ao longo da via, grande parte do traçado tem zonas com azinheiras e sobreiros, que sendo árvores protegidas requerem licença para abate, o que torna o processo de produção muito mais demorado.



Fig. 40 – Área escolhida para a execução de stocks (Conduril, 2022)

4.4.5 TEMPO DE INTERDIÇÃO DISPONÍVEL

A interdição refere-se ao período em que a linha ferroviária ou parte dela é fechada para permitir a realização das atividades de construção ou manutenção.

Na obra em estudo, no que se refere aos períodos de interdição, tem-se 7h de segunda a sexta e 12h no sábado e no domingo. Os tratamentos de plataforma por serem uma atividade que apresenta um baixo rendimento em interdições pequenas, têm de ser realizados somente nas interdições de 12h.

A execução de uma obra numa linha ferroviária em exploração, que requer interdições, resulta num rendimento reduzido, uma vez que a execução das atividades não ocorre de forma contínua.

4.4.6 QUALIDADE DOS ATERROS EXISTENTES

Os aterros existentes possuem uma idade considerável, em torno de 120 a 130 anos, e são frequentemente constituídos por material relativamente solto.

Durante o processo de remoção da camada superficial da fundação, conhecida como "calo de via", para a escavação e tratamento da plataforma, foram muitas vezes encontrados buracos vazios e pedras no corpo do aterro ao atingir a cota necessária para a aplicação da camada de rachão. Estas situações exigem tempo adicional, pois requerem uma análise geotécnica e execução das atividades de tratamento.

4.5 SOLUÇÃO ALTERNATIVA DE TRATAMENTO DO SOLO COM CAL E CIMENTO

Devido à escassez de materiais de boa qualidade para uso nas camadas da subestrutura ferroviária, é normalmente necessário proceder ao empréstimo ou realizar a extração de materiais de terrenos próximos. No entanto, devido ao considerável impacto económico e ambiental associado a esse método, surge a necessidade de procurar alternativas mais vantajosas.

Uma alternativa possível é o tratamento do solo com cal e cimento. A cal ajuda a melhorar as características geotécnicas do solo, provocando uma diminuição da plasticidade, aumento da trabalhabilidade, redução da expansibilidade e aumento de resistência. O cimento, por sua vez, proporciona, de forma mais relevante, maior resistência mecânica e menor deformabilidade do solo tratado.

No subcapítulo 3.3.1, foi descrito, de forma sintética, o processo construtivo do tratamento do solo com cal. A técnica de execução do tratamento com cimento (Fig. 41) é semelhante à mencionada anteriormente.



Fig. 41 – Esquema elucidativo da execução da estabilização do solo com cimento (Wirtgen, 2023)

No estudo efetuado nesta dissertação, foi analisada a viabilidade desta solução realizada *in situ* devido às diversas vantagens que traria para a obra em questão, nomeadamente:

- Evitar a substituição dos materiais existentes nas áreas das obras;
- Redução de custos relacionados com aquisição e transporte de materiais;
- Diminuição dos prazos de execução das obras e minimização dos impactos ambientais.

4.5.1 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO A TRATAR

A Classificação Francesa descrita no *Guide Terrassements Routiers (GTR)* (LCPC/SETRA, 1992) é baseada na caracterização dos solos e rochas, levando em consideração as suas características intrínsecas (granulometria e plasticidade), de estado (estado hídrico e compacidade) e a resistência mecânica das partículas.

Para adotar a metodologia GTR no desenvolvimento do trabalho, é relevante fazer uma breve descrição da classificação de geomateriais proposta pela norma francesa NF P 11-300 (AFNOR, 1992).

Esta classificação divide os materiais em 6 grupos distintos, nomeadamente: A (Solos finos como argilas, siltes); B (Solos arenosos e cascalhentos com finos); C (Solos com partículas grosseiras); D (Solos e rochas insensíveis à água); R (Materiais rochosos); F (Solos orgânicos e subprodutos industriais).

Na Fig. 42 e na Fig. 43, apresenta-se esquematicamente a classificação dos materiais, atendendo à granulometria (material que passa nos peneiros de 80µm e 2mm), plasticidade (índice de plasticidade e valor do azul de metileno), para solos com partículas de dimensão máxima igual ou inferior a 50 mm, bem como para solos com partículas com dimensão máxima superior a 50 mm, respetivamente.

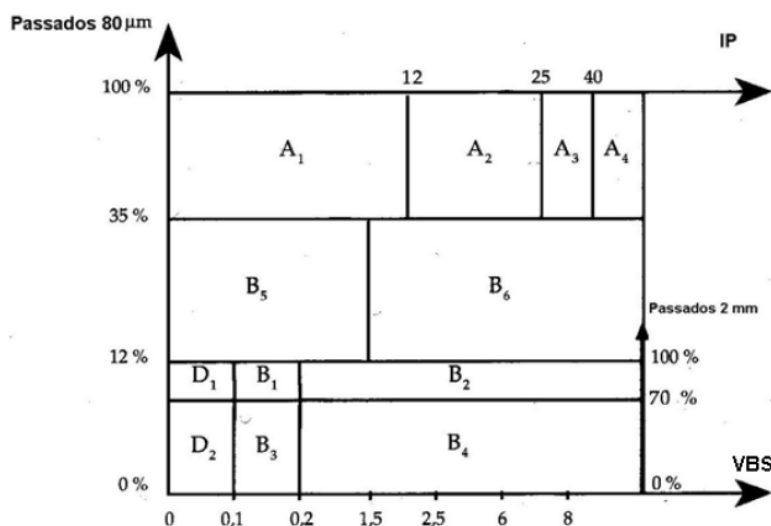


Fig. 42 – Classificação de solos com dimensão máxima ≤ 50 mm (LCPC e SETRA, 1992)

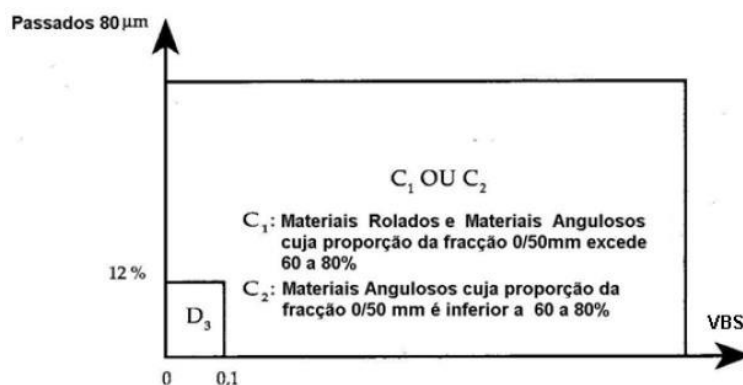


Fig. 43 – Classificação de solos com dimensão máxima > 50 mm (LCPC e SETRA, 1992)

O zonamento da plataforma obtido em obra teve por base os materiais ocorrentes ao nível da camada de coroamento, identificados com recurso a ensaios laboratoriais realizados sobre as amostras colhidas nos poços de auscultação da plataforma de via (PAV), a resultados dos ensaios de carga com placa e ainda aos parâmetros relativos à qualidade de via. No Quadro 8, apresenta-se a classificação dos materiais segundo as classificações do CODE 719 R da UIC (2008), ASTM (1985), AASHTO (1995) e AFNOR (1992).

Quadro 8 – Classificação dos materiais ocorrentes ao nível da camada de coroamento (Conduril, 2019)

Poço	Ponto quilométrico	Perfil	UIC	ASTM	AASHTO	AFNOR
PAV18A	234+100	Aterro	QS2	SM	A-1-B(0)	B5
PAV18	232+100	Misto	QS2	SM	A-1-B(0)	B5
PAV20	235+900	Misto	QS1	SM	A-1-B(0)	B5
PAV21	237+650	Misto	QS1	SM	A-1-B(0)	B5
PAV22	239+800	Aterro	QS1	SM	A-1-B(0)	B5
PAV24	243+000	Aterro	QS1	SM	A-1-B(0)	B5

Segundo a classificação AFNOR (1992), o solo existente na plataforma do trecho em análise é classificado como B5. Apresenta resultados obtidos nos ensaios do azul de metileno (VBS) que variam entre 1 e 1,2 e em termos de plasticidade, é considerado não plástico. Deste modo, segundo o Quadro 9, e de forma conservativa (LCPC/SETRA, 2000), pode adotar-se um tratamento composto por 1% de Cal e por 7% de cimento, para a construção da camada de coroamento com solo tratado.

Quadro 9 – Modalidades de tratamento a aplicar em função da classe do solo (LCPC/SETRA, 2000)

Quadro V Classe do solo (AFNOR, 1992)	Modalidade de tratamento
A ₁ [*] , B ₅ [*] C ₁ A ₁ [*] , C ₁ B ₅ [*] C ₂ A ₁ [*] , C ₂ B ₅ [*]	1,0 % CaO + 7 % C _{32,5}
A ₂ , B ₆ C ₁ A ₂ , C ₁ B ₆ C ₂ A ₂ , C ₂ B ₆	1,5 % CaO + 7 % C _{32,5}
A ₃ , C ₁ A ₃ , C ₂ A ₃	2,0 % CaO + 7 % C _{32,5} ou 6 % CaO
B ₁ , B ₂ , D ₁ C ₁ B ₁ , C ₁ B ₂	6 % C _{32,5} + corretor eventual ☼
B ₃ , B ₄ , D ₂ , D ₃ C ₁ B ₃ , C ₁ B ₄ C ₂ B ₃ , C ₂ B ₄	5 % C _{32,5}
Outros materiais	A definir com base num estudo de Nível 1
<p>* Quando estes materiais são pouco argilosos (VBS < 0,5), o tratamento com cal não é indispensável</p> <p>☼ A escolha da natureza e dosagem do corretor eventual deve ter em conta a experiência local</p>	

4.5.2 DEFINIÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA ADOTADA

Para implementar o processo de tratamento, é necessário ter informações precisas sobre a espessura da camada a ser tratada. Devido à falta de ensaios laboratoriais, essa informação foi obtida de maneira empírica, utilizando como referência o manual francês "*Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques*" (LCPC/SETRA, 2000).

Na Fig. 44, estão definidas as zonas de classificação de um material em função do seu módulo de deformabilidade (E) e da sua resistência à tração (Rt). A zona 1 é a que apresenta os materiais de melhores características e a zona 5 apresenta os materiais de piores características.

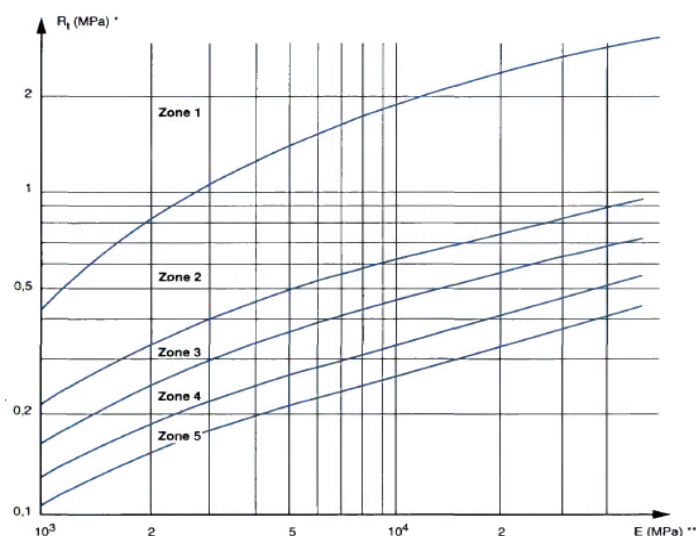


Fig. 44 – Classificação do material tratado com ligantes em função de R_t e E (LCPC/SETRA, 2000)

Considerando um material localizado na zona 2, este possui características adequadas para a construção da camada de coroamento, atendendo ao seu módulo de deformabilidade e à sua resistência à tração. Durante o processo de tratamento, os materiais serão misturados *in situ*, pelo que é difícil obter homogeneidade da mistura. Assim, de acordo com o Quadro 10, classifica-se o material como sendo de classe 3.

Quadro 10 – Determinação da classe mecânica de um material tratado em função das suas características e do seu modo de fabrico (LCPC/SETRA, 2000)

Tratamento em central	Tratamento "in situ"	Classe mecânica do material
Zona 1		1
Zona 2	Zona 1	2
Zona 3	Zona 2	3
Zona 4	Zona 3	4
Zona 5	Zona 4	5

Dos resultados obtidos nos ensaios de carga com placa (Quadro 11), pode-se constatar que o módulo de deformabilidade equivalente medido no topo da fundação excede sempre 60 MPa, o que vai de encontro ao valor mínimo sugerido pelo CODE 719 R (UIC, 2008).

Quadro 11 – Resultados obtidos nos ensaios de carga com placa (Conduril, 2019)

Poço	Ponto quilométrico	Perfil	EV ₁ (MPa)	EV ₂ (MPa)	EV ₁ /EV ₂ (MPa)
PAV18A	234+100	Aterro	31,4	72,6	2,3
PAV18	232+100	Misto	59,8	116,9	2,0
PAV20	235+900	Misto	40,6	92,8	2,3
PAV21	237+650	Misto	42,1	90,9	2,2
PAV22	239+800	Aterro	26	66,7	2,6
PAV24	243+000	Aterro	42	84,9	2,0

Considerando a informação apresentada no Quadro 12 (LCPC/SETRA, 2000), a classe mecânica do material definida anteriormente (classe 3), o valor mínimo do módulo de deformabilidade medido no topo da plataforma (60 MPa), e que se pretende obter um valor mínimo do módulo de deformabilidade no topo da camada de leito de 80 MPa, é possível estabelecer uma espessura de 0,25 m para a camada de leito.

Quadro 12 – Determinação da classe de plataforma (PF) em função da classe mecânica do material de leito (LCPC/SETRA, 2000)

Quadro XI Classe mecânica do material de leito	Espessura mínima da camada de leito (cm)				
	Terraplenagem de classe AR ₁ (E>20 MPa)			Terraplenagem de classe AR ₂ (E>50 MPa)	
Classe 3	*	30	40	25	30
Classe 4	30	35	45 ☼	30	35
Classe 5	35	50 ☼	55 ☼	35	45 ☼
Classe de plataforma obtida	PF ₂ (E>50MPa)	PF ₃ (E>120MPa)	PF ₄ (E>200MPa)	PF ₃ (E>120MPa)	PF ₄ (E>200MPa)
<p>* não pode ser inferior a 30 cm devido ao contraste de rigidez relativamente à AR₁;</p> <p>☼ para obter a compacidade requerida no fundo da camada é geralmente necessário colocar em 2 camadas</p>					

4.6 COMPARAÇÃO ENTRE A SOLUÇÃO TRADICIONAL E A SOLUÇÃO ALTERNATIVA

4.6.1 ESTIMATIVA DE CUSTO COM BASE NA NATUREZA DOS RECURSOS ENVOLVIDOS

4.6.1.1 Solução tradicional

Foi realizada uma estimativa do custo de uma intervenção num dos trechos onde se executou a solução 3, a qual foi implementada onde a plataforma apresenta piores características geotécnicas.

Atendendo aos preços praticados no mercado da construção, considerou-se uma área de 48 m de comprimento por 9 m de largura e um tempo de interdição correspondente a 12 h, uma vez que estes trabalhos devem ser realizados durante os períodos de maior duração de interrupção da linha.

Começou-se por fazer uma estimativa de toda a mão de obra necessária para cada intervenção, como mostra o Quadro 13.

Quadro 13 – Estimativa do custo da mão de obra

Categoria	Número	Salário (€/h)	Custo total (€/h)	Custo de uma interdição de 12h (€)
Encarregado	1	21,78	21,78	261,36
Servente	9	11,80	106,20	1274,40
Manobrador	6	15,85	95,10	1141,20
Motorista	2	15,85	31,70	380,40
Técnico de segurança	1	26,71	26,71	320,52
Topógrafo	1	24,08	24,08	288,96
Técnico de laboratório	1	16,63	16,63	199,56
Ajudante	2	11,80	23,60	283,20
Custo total da mão de obra (€)				4149,60

De seguida, contabilizaram-se os equipamentos necessários durante a obra e estimou-se o custo de cada um deles (Quadro 14).

Quadro 14 – Estimativa do custo dos equipamentos

Equipamento	Número	Custo (€/h)	Custo total (€/h)	Custo de uma interdição de 12h (€)
Retroescavadora	1	40,9	40,9	490,8
Motoniveladora	1	75,91	75,91	910,92
Giratória de pneus	2	70,06	140,12	1681,44
Trator cisterna	1	66,9	66,9	802,8
Dumper	2	64,88	129,76	1557,12
Camião	2	55,99	111,98	1343,76
Cilindro	2	56,45	112,9	1354,8
Custo total dos equipamentos (€)				8141,64

Por fim, estimou-se o custo dos vários materiais utilizados no tratamento do trecho, como apresentado no Quadro 15.

Quadro 15 – Estimativa do custo dos materiais

Materiais	Quantidade	Custo total (€)
Balastro (11,3 €/t)	55 m ³	1615,9
Rachão (14,50 €/m ³)	95 m ³	1377,5
Geotêxtil (0,47 €/m ²)	695 m ²	326,70
Custo total dos materiais (€)		3320,10

Tendo em consideração o custo total da mão de obra, dos equipamentos e dos materiais, a estimativa orçamental relativa a uma intervenção de 12 h é de 15.611,3 €. No entanto, é importante realçar que esta estimativa ainda requer a consideração do impacto que cada uma das condicionantes mencionadas no subcapítulo 4.4 têm no valor final da obra.

4.6.1.2 Solução alternativa

Em relação à alternativa de construção com cal e cimento, também foi realizada uma estimativa dos custos para a intervenção. Para essa estimativa, foram considerados os parâmetros estabelecidos anteriormente em 4.6.1.1.

Começou-se por fazer uma estimativa de toda a mão de obra necessária para cada intervenção, como mostra o Quadro 16.

Quadro 16 – Estimativa do custo da mão de obra

Categoria	Número	Salário (€/h)	Custo total (€/h)	Custo de uma interdição de 12h (€)
Encarregado	1	21,78	21,78	261,36
Servente	4	11,80	47,20	566,40
Manobrador	4	15,85	63,40	760,80
Técnico de segurança	1	26,71	26,71	320,52
Topógrafo	1	24,08	24,08	288,96
Técnico de laboratório	1	16,63	16,63	199,56
Ajudante	2	11,80	23,60	283,20
Custo total da mão de obra (€)				2680,80

De seguida, contabilizaram-se os equipamentos necessários durante a obra e estimou-se o custo de cada um deles (Quadro 17).

Quadro 17 – Estimativa do custo dos equipamentos

Equipamento	Número	Custo (€/h)	Custo total (€/h)	Custo de uma interdição de 12h (€)
Pá carregadora	1	45,68	45,68	548,16
Motoniveladora	1	75,91	75,91	910,92
Compactador monocilíndrico	1	71,16	71,16	853,92
Camião cisterna	1	125,43	125,43	1505,16
Custo total dos equipamentos (€)				3818,16

Por fim, estimou-se o custo dos vários materiais utilizados no tratamento do trecho, como apresentado no Quadro 18.

Quadro 18 – Estimativa do custo dos materiais

Materiais	Quantidade (t)	Custo total (€)
Balastro (11,3 €/t)	143	1615,9
Cal aérea hidratada tipo CL 90-S (91,95 €/t)	1,728	158,89
Cimento CEM II / A-L 32,5 N (91,58 €/t)	10,58	969,28
Custo total dos materiais (€)		2744,07

Tendo em consideração o custo total da mão de obra, dos equipamentos e dos materiais, a estimativa orçamental relativa a uma intervenção de 12 h é de 9.243,03 €.

4.6.2 CUSTO ASSOCIADO ÀS DIVERSAS ETAPAS CONSTRUTIVAS

Em obra, durante o tempo de interdição, pode haver situações em que nem sempre seja possível executar todas as etapas de tratamento de plataforma conforme o planeado. Existem vários fatores que podem condicionar as intervenções, como condições atmosféricas desfavoráveis, limitações de recursos, em particular de materiais, imprevistos durante a execução ou restrições de tempo.

Adotando a média das áreas tratadas, tem-se um trecho de 48 m de extensão, uma largura de 9 m e 0,35 m de espessura da camada de coroamento.

O Quadro 19, apresenta os custos associados ao tratamento da camada de coroamento num aterro recorrendo a material de empréstimo.

Quadro 19 – Custos de construção de um aterro com material de empréstimo

Escavação e construção com materiais de empréstimo	
Escavação do solo (2,80 €/m ³)	423,36 €
Transporte para depósito (6,00 €/m ³)	907,20 €
Depósito (5,50 €/m ³)	831,60 €
Compra de agregados (ABGE) (10,00 €/m ³)	1512,00 €
Transporte dos agregados (6,00 €/m ³)	907,20 €
Nivelamento e compactação (3,80 €/m ³)	574,56 €
Volume	151,2 m ³
Total da obra	5155,92 €

Para calcular os custos relacionados com a solução alternativa de execução da camada de coroamento com solos tratados, foram considerados os valores de mercado para a cal e para o cimento, juntamente com os dados fornecidos pelo empreiteiro referentes às diversas etapas de construção. Utilizando as mesmas dimensões do trecho anterior, com 48 m de extensão, 9 m de largura e uma espessura de camada de coroamento de 0,25 m, que foi determinada previamente por métodos empíricos, é possível determinar os custos envolvidos.

O Quadro 20, apresenta os custos associados ao tratamento da camada de coroamento, recorrendo a solo tratado *in situ*.

Quadro 20 – Custos de construção de uma camada com solo tratado *in situ*

Solo tratado <i>in situ</i> com 1% de cal + 7% de cimento	
Compra de cal entregue no local da obra (91,95 €/t)	158,89 €
Compra de cimento entregue no local da obra (91,58 €/t)	969,28 €
Mistura e espalhamento (4,00 €/m ³)	432,00 €
Nivelamento e compactação (3,80 €/m ³)	410,40 €
Volume	108 m ³
Total da obra	1970,57 €

Como se pode constatar, os custos relacionados com a construção da camada de coroamento usando apenas material de empréstimo, são significativamente mais elevados, quase três vezes superiores, em comparação com os custos associados à construção da camada com tratamento do solo *in situ*.

Assim, poderia ser realizado o tratamento com cal e cimento nas zonas identificadas como alvos de intervenção. Conforme mencionado anteriormente em 4.2, os tratamentos seriam aplicados num trecho de 3520 m.

Considerando todos os dados mencionados para cada tipo de solução, é viável calcular o custo associado. O custo de construção da camada de coroamento é de 378.100,80 € quando se utiliza material de empréstimo, e de 144.508,64 € quando se opta pelo solo tratado *in situ*.

4.6.3 IMPACTO AMBIENTAL

Em termos gerais, a construção de uma camada com material de empréstimo tende a resultar em emissões de carbono mais altas, quando comparado com a construção de uma camada utilizando solo tratado *in situ*.

No caso da construção com material de empréstimo, a extração do solo de uma área de empréstimo e o transporte até o local de construção podem resultar em emissões significativas de carbono, especialmente se houver longas distâncias envolvidas, que no caso em questão são cerca de 30 km. Além disso, o processo de transporte em si também consome energia e combustíveis fósseis, contribuindo para as emissões de carbono.

Por outro lado, ao optar pelo solo tratado *in situ*, a necessidade de transporte de material é eliminada, o que pode reduzir consideravelmente as emissões de carbono associadas. No entanto, é importante levar em consideração o consumo de energia e as emissões de carbono decorrentes do próprio processo de tratamento, como a utilização de máquinas e equipamentos. Além disso, as emissões associadas ao processo produtivo da cal podem também ser relevantes.

Ainda assim, estima-se que o impacto desta técnica seja consideravelmente menor do que a técnica convencional.

5

CONCLUSÃO

5.1 CONCLUSÕES GERAIS DA DISSERTAÇÃO

As soluções adotadas no tratamento das plataformas ferroviárias nem sempre são as mais adequadas do ponto de vista económico e ambiental. A escolha da técnica de tratamento deve ter em consideração uma série de fatores, como o custo dos materiais, os recursos disponíveis, as restrições operacionais, as condições locais e os impactos ambientais.

Considerando a solução de tratamento da camada de coroamento com cal e cimento, é possível observar que, do ponto de vista económico, seria mais vantajoso adotá-la em substituição da solução tradicional de construção com ABGE.

Esta solução alternativa apresenta um processo de execução mais simplificado, resultando numa redução no tempo de execução e conclusão da obra. Como resultado, os custos totais serão naturalmente reduzidos. Outra vantagem que esta solução traria é a possibilidade de reutilizar o solo existente no local. Isso eliminaria os custos relacionados com a escavação do solo, transporte do local de escavação para a área de depósito e a necessidade de adquirir agregados externos. Para além disso, esta abordagem também resultaria numa redução significativa do impacto ambiental, fator de extrema importância atualmente.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como sugestão a desenvolvimentos futuros, seria importante integrar a questão da pegada de carbono nos vários tipos de tratamento de plataformas ferroviárias visando uma evolução sustentável e ecologicamente responsável.

Seria interessante realizar uma análise detalhada das emissões de carbono ao longo de todo o ciclo de vida da infraestrutura ferroviária. Isto envolve identificar e quantificar as fontes de emissões, como a energia consumida na construção, o transporte de materiais, o consumo de energia durante a operação e a manutenção contínua. Com estes dados, é possível determinar os principais pontos de emissão e desenvolver estratégias eficazes de redução.

Sobretudo, seria interessante desenvolver uma calculadora de carbono com foco específico na área ferroviária que permitiria uma quantificação precisa das emissões de CO₂. Esta ferramenta desempenharia um papel importante na identificação de áreas de melhoria, comparação com outras modalidades de transporte, transparência e responsabilidade ambiental por parte das empresas, para além de ser a fonte de inovação e pesquisa para tornar a ferrovia mais sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1995). M 145. *Classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes*. Standard Specifications for Transportation Material and Methods of Sampling and Testing.
- AFNOR (1992). NF P 11-300. *Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières*.
- Almeida, B. (2020). *Elaboração de projeto de execução ferroviário no Malawi*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Almeida, M., Marques, M. (2010). *Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho*. Oficina de textos, São Paulo.
- Alves, J. (2010). *Avaliação de dimensionamento da subestrutura ferroviária de linhas de alta velocidade*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa.
- Antunes, P. (2016). *Técnicas de melhoramento de solos e metodologia de seleção*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- ASTM (1985). D 2487. *Standard classification of soils for engineering purposes* (Unified Soil Classification System).
- Botelho, M. (2008). *Estados limites últimos e de utilização em terraplanagens para vias-férreas de alta velocidade: Soluções para tratamento da fundação da via*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Carvalho, A. (2020). *Manutenção da qualidade das infraestruturas ferroviárias com reutilização de travessas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Conduril (2019). *Volume 04 – Terraplanagens, Drenagem e Vedações*. Projeto de execução da modernização da via – KM 223+537 a KM 252+091. Lisboa
- Conduril (2020). *Volume 00 – Apresentação Geral*. Projeto de execução da modernização da via – KM 223+537 a KM 252+091. Lisboa
- Cruz, J. (2008). *Avaliação do Estado da Arte da Aplicação de Solos Tratados com Cal no Âmbito das Infra-Estruturas de Transporte*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- DiPilato, M. A.; Steinberg, E. I.; Simon, R. M. (1983). *Ballast and subgrade requirements study. Railroad track substructure. Design and performance. Evaluation Practices*. Federal Railroad Administration. Office of Research and Development. Washington, D.C., USA.
- Esmaili, M., Fathali, M., Mosayebi, A. (2011). *Stabilization of loose railway subgrade utilizing jet grouting method*. Géotechnique ferroviaire. Symposium international, Vol. 1, pp. 555-564. ISBN: 978-2-7208-2594-1.
- Evans, A., Evans, R. (2006). *Rubber/plastic composite rail sleepers*, The Waste & Resources Action Programme, Tyres report no: TYR0009-27, Oxfordshire, United Kingdom.
- Faria, A. (2012). *Noções Elementares sobre Orçamentos de Obras de Construção Civil*. Gestão de obras e segurança. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fernandes, J. (2011). *Modelação do comportamento mecânico de vias-férreas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

- Fortunato, E. (2005), *Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Francisco, A., Paixão, A., Varandas, J., Fortunato, E. (2018). *Short soil–binder columns in railway track reinforcement: three–dimensional numerical studies considering the train–track interaction*. Computers and Geotechnics, Vol. 98, pp. 8-16. ISSN: 0266-352X.
- Housh, M., Cai, X. (2015). *Successive smoothing algorithm for solving large-scale optimization models with fixed cost*. Annals of Operations Research, Vol. 229, pp. 475-500. ISSN: 0254-5330.
- Júnior, A. (2018). *Jet-Grouting: reforço da fundação de um edifício assente sobre solos moles*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Kempfert, H., Gebreselassie, B. (2006). Soil stabilisation with column-like elements. In *Excavations and Foundations in Soft Soils*, pp. 461-523. ISSN: 3540328947.
- Kouby, A., Bourgeois, E., Rocher-Lacoste, F. (2009). Renforcement du sol support d'une voie ferroviaire existante par des colonnes de sol-ciment. International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, 2, 3 and 4, pp. 2172-2175. Doi: 10.3233/978-1-60750-031-5-2172.
- LCPC/SETRA (1992). *Réalisation des remblais et des couches de forme*. Guide technique: Fascicules I et II, Paris.
- LCPC/SETRA (2000). *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques: application à la réalisation des remblais et des couches de forme*. Guide technique. ISBN: 2-7208-3810-1.
- Leite, M. (2017). *Especificações técnicas da via-férrea*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Li, D., Otter, D., Carr, G. (2010). *Railway bridge approaches under heavy axle load traffic: problems, causes, and remedies*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 224, No. 5, pp. 383-390. doi:10.1243/09544097JRRT345.
- Li, Y. (2018). *Pegada de carbono: o caso da cidade do porto*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Macedo, J. (2017). *Reabilitação de infraestruturas ferroviárias mediante o tratamento das plataformas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Mendes, S. (2011). *Caracterização mecânica de misturas betuminosas a aplicar em infra-estruturas de transportes*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Moreira, A. (2014). *Métodos de dimensionamento de vias-férreas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Mourão, J. (2017). *Gestão e manutenção da infra-estrutura ferroviária, os vários tipos de ações de manutenção*. Relatório de Estágio em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Nascimento, P. (2020). *Avaliação da Sustentabilidade Ambiental do Transporte Ferroviário: Cálculo da Pegada de Carbono*. Dissertação de Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente, Faculdade de Economia da Universidade do Porto.
- Oliveira, A. (2012). *Via balastrada versus via não balastrada*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

- Paixão, A., Fortunato, E. (2009). *Novas soluções de superestrutura de via para a alta velocidade ferroviária: comparação com a via balastrada tradicional*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. ISBN 978-972-49-2173-0.
- Pinto, N. (2009). *Contribuição para o estudo da combinação de cal com cimento no tratamento de solos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Pires, D. (2018). *Reabilitação de infraestruturas ferroviárias. Aplicação de geogrelhas na camada de balastro*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Pita, A., Teixeira, P., Robusté, F. (2006). *Nuevas tendencias en el proyecto de infraestructuras ferroviarias: La utilización de materiales bituminosos como subbalasto*. X Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Valencia, Vol. 13.
- Quaresma, M. (1992). *Comportement et modélisation d'un remblai sur sols mous renforcé par géotextile*. Thèse de doctorat en Geotech, L'Université Joseph Fourier.
- Radampola, S. (2006). *Evaluation and modelling performance of capping layer in railtrack substructure*. PhD thesis, Central Queensland University, Centre for Railway Engineering.
- Refer (2004). *IT.GEO.001 – Fornecimento de balastro e gravilha*.
- Refer (2007). *IT.GEO.006 – Características técnicas do sub-balastro*.
- Refer (2015). *IT.VIA.015 – Especificações técnicas para fornecimento de balastro novo*.
- Ribeiro, V. (2015). *Estudos sobre métodos não destrutivos de caracterização do comportamento dinâmico da via-férrea com diversos tipos de fundação*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Rodrigues, A. (2018). *Técnicas de injeção. Jet grouting, aplicações e regras de dimensionamento*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.
- Roshan, M., Rashid, A., Wahab, N. et Al. (2022). *Improved methods to prevent railway embankment failure and subgrade degradation: A review*. Transportation Geotechnics, Vol. 37, 100834. ISSN: 2214-3912.
- Rubinsztein, Y. (2011). *Automatic detection of objects of interest from rail track images*. Masters of Science dissertation, Faculty of Engineering and Physical Science, University of Manchester.
- Seguro, H. (2020). *Acompanhamento de obra ferroviária: “Linha do Norte–substituição de travessas monobloco fissuradas, entre os Km 232.500 e 291.000 vias A e D”*. Relatório de Estágio em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Silva, P. (2016). *Controlo e análise de custos numa empresa de construção civil*. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, Universidade do Minho.
- Smekal, A. (2008). *Strengthening methods for subsoil under existing railway lines*. Proc. 8th World Congr Railw Res, pp. 1-11.
- Teresinho, C. (2014). *Formulação de preços na construção*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

UIC (2008). CODE 719 R *Earthworks and track bed for railway lines*. Union Internationale des Chemins de Fer.

Vale, C. (2010). *Influência da qualidade dos sistemas ferroviários no comportamento dinâmico e no planeamento da manutenção preventiva de vias de alta velocidade*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Wiedmann, T. (2009). *Carbon footprint and input–output analysis—an introduction*. Taylor & Francis, Vol. 21, pp. 175-186. doi: 10.1080/09535310903541256.

Wiedmann, T., Minx, J. (2008). A definition of ‘carbon footprint’. In *Ecological economics research trends*, Vol. 1, pp. 1-11. ISBN: 1-60021-941-1.

American Wick Drain. *PVD WICK DRAINS*. Disponível em <https://www.awd-usa.com/products/pvd-wick-drains>. Acesso a 30/4/2023

ArcelorMittal. *Rail profile 60E1 (UIC60)*. Disponível em <https://rails.arcelormittal.com/types-rails/transport-rails/european-standards/rail-uic60-60e1>. Acesso a 10/3/2023

Cobblumber. *Building plans projects*. Disponível em <https://www.cobblumber.com/ties/>. Acesso a 11/3/2023

Conduril (2021). Registos fotográficos.

Conduril (2022). Registos fotográficos.

GeoSoluções. *Geocélulas StrataWeb*. Disponível em <https://www.geosolucoes.com/geocelulas-strataweb>. Acesso a 30/4/2023

GeoSoluções. *Utilização de geogrelhas com geodrenos*. Disponível em <https://www.geosolucoes.com/copia-reforco-de-solos-moles-2?lightbox=dataItem-jfsdm7pl>. Acesso a 30/4/2023

Hayward Baker. *Jet Grouting*. Disponível em <https://research.engineering.ucdavis.edu/gpa/ground-improvement/jet-grouting/>. Acesso a 30/4/2023

Hidremec. *Dormentes de aço*. Disponível em <http://www.hidremec.com.br/index.php>. Acesso a 11/3/2023

<http://geradordeprecos.cype.pt/>. Acesso a 10/5/2023

IS.COM. *Perfil transversal de uma travessa*. Disponível em <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fis-com.biz%2Findex.php%2Fpt%2Ftecnologia-e-aplicacoes%2Fcaminhos-de-ferro&psig=AOvVaw3VdN5oExiKmAZPg-Raab04&ust=1682422054217000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjRxqFwoTCODuzdm0wv4CFQAAAAAdAAAAABAE>. Acesso a 12/3/2023

Keller. *Compensation / fracture grouting*. Disponível em <https://www.kellerme.com/expertise/techniques/compensation-fracture-grouting>. Acesso a 3/5/2023

Liebherr. *Compactação de solo dinâmica com pesos de compressão*. Disponível em <https://www.liebherr.com/pt/bra/produtos/maquinas-de-construcao/fundacao-profunda/metodos/melhoria-do-solo/compactacao-por-impacto/compactacao-por-impacto.html>. Acesso a 1/5/2023

Railsystem.net. *Jet Grouting*. Disponível em <https://railsystem.net/jet-grouting/>. Acesso a 30/4/2023

RAITO, Inc. *Single-auger Large-diameter DSM for Large Diameter, homogenous Column Improvement with RAS Column*. Disponível em <https://www.raitoinc.com/technologies/single-large-diameter/>. Acesso a 1/5/2023

Sotecnisol. *Geogrelha Monolitica Tensar Triaxial TX*. Disponível em <https://www.obras360.pt/loja/tensar/0040030323ts-geogrelha-tensar-triaxial-tx>. Acesso a 30/4/2023

Sotecnisol. *Manta Geotêxtil em Polipropileno Geotesan NT*. Disponível em <https://www.obras360.pt/loja/geotexan/0040020187gt-manta-geotextil-em-polipropileno-geotesan-nt>. Acesso a 30/4/2023

TERRATEST. *Colunas de Brita*. Disponível em <https://www.terratest.com/portugues/produtos-colunas-de-brita.html>. Acesso a 2/5/2023

theconstructor.org. *How to Use blasting for Deep Compaction of Soil?* Disponível em <https://theconstructor.org/geotechnical/blasting-deep-compaction-soil/46113/>. Acesso a 2/5/2023

Wirtgen. *Preparação ampla de solos sem capacidade de carga*. Disponível em <https://www.wirtgen-group.com/pt-pt/aplicacoes/terraplanagem/estabilizacao-do-solo/>. Acesso a 3/5/2023