

# CARACTERIZAÇÃO, ZONAMENTO E TRATAMENTO DE UMA PLATAFORMA FERROVIÁRIA EXISTENTE

Henrique Lopes<sup>1</sup>, Nelson Rodrigues<sup>2</sup>, Bárbara Peniche<sup>2</sup> e Jaime Santos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TPF Consultores de Engenharia e Arquitetura S.A., Serviço de Geologia e Geotecnia Rua Laura Alves12 8º Piso, 1050-138 Lisboa, Portugal

email: [henrique.lopes@tpf.pt](mailto:henrique.lopes@tpf.pt) <http://www.tpf.pt>

<sup>2</sup> TPF Consultores de Engenharia e Arquitetura S.A., Serviço de Geologia e Geotecnia Rua Laura Alves12 8º Piso, 1050-138 Lisboa, Portugal

---

## Sumário

*A plataforma ferroviária constitui a superfície de apoio da camada de sub-balastro, imediatamente abaixo da superestrutura de via. O seu adequado desempenho trata-se de uma das premissas para o eficaz funcionamento de toda a infraestrutura ferroviária e, conseqüentemente, para uma exploração dentro dos padrões de referência estabelecidos em projeto.*

*No presente artigo pretende-se apresentar o trabalho desenvolvido no âmbito de um projeto de modernização de via férrea, apresentando-se em primeiro lugar os trabalhos de auscultação e caracterização geotécnica da plataforma ferroviária existente e o seu decorrente zonamento. Em segundo lugar serão abordados os estudos desenvolvidos tendo em vista a otimização das espessuras de tratamento recomendadas na ficha UIC 719-R, atualmente substituída pela IRS70719-Ed.1 de 2020, através da consideração das características específicas locais.*

---

**Palavras-chave:** Plataforma; Tratamento; Reforço; Zonamento; Auscultação

## 1 INTRODUÇÃO

O leito de via (ou coroamento) constitui a camada mais superficial da designada subestrutura ferroviária, constituindo a fundação da camada de sub-balastro, devendo apresentar uma rigidez adequada e uma capacidade resistente suficiente para suportar o carregamento induzido pela passagem das circulações, promovendo a degradação gradual das cargas transmitidas ao solo subjacente, de pior qualidade, para que daí não resultem assentamentos excessivos que comprometam o desempenho de toda a superestrutura, em geral materializados pelo desalinhamento e desnivelamento dos carris.

A ocorrência de uma camada de leito de via constituída por materiais desadequados, resulta na obtenção de plataformas cujo deficiente comportamento pode condicionar consideravelmente o desempenho da superestrutura, já que a plataforma de via, e em especial a camada de leito de via, constituem a sua fundação. Para além da adequabilidade dos materiais para a sua utilização ao nível da camada de leito de via, é importante que estes, após a sua aplicação, apresentem uma rigidez adequada, não devendo esta ser demasiado reduzida ou, por outro lado, demasiado elevada. Em relação ao primeiro caso, Lavaredas *et al.* (2009) referem problemas ao nível do conforto e segurança, resultado das dificuldades em manter o nivelamento longitudinal. Por outro lado, os mesmos autores referem que plataformas demasiado rígidas poderão, eventualmente, conduzir a um maior desgaste dos carris, no contacto travessa balastro e do próprio balastro.

A avaliação da capacidade de carga da plataforma ferroviária tem por base valores mínimos de módulo de deformabilidade equivalente, medidos no topo de cada uma das camadas que constituem a infraestrutura ferroviária. As recomendações UIC 719-R, definem um conjunto de valores mínimos para o módulo de deformabilidade no segundo ciclo de carga, os quais deverão ser garantidos para que o desempenho seja o adequado. Assim, segundo aquelas recomendações, deverão ser alcançados valores de  $E_{v2}$  de pelo menos 60 MPa ao nível da fundação, 80 MPa no topo da camada de leito de via e, por fim, 120 MPa no topo da camada de sub-balastro.

No âmbito do projeto de modernização de uma linha ferroviária procedeu-se ao zonamento da atual plataforma, com o objetivo de identificar zonas com eventuais características deficientes para as quais se pretendia propor tratamento visando o alcance de uma plataforma maioritariamente de boa qualidade, ou seja, de classe P3, como requerido no caderno de encargos.

Os tratamentos propostos, materializados pela substituição de materiais, revelaram rapidamente constituir um dos caminhos críticos do faseamento executivo. Isto resultou na necessidade de otimizar as espessuras propostas pela *International Union of Railways* na sua ficha UIC 719-R, com o objetivo de, em primeiro lugar, reduzir os tempos de execução das obras, e, em segundo, otimizar os custos associados a estes tratamentos.

O presente artigo pretende apresentar, de forma resumida, a metodologia adotada para definição do zonamento e os estudos desenvolvidos para otimização das espessuras de tratamento a aplicar nas zonas com deficiente comportamento. De notar que a metodologia apresentada é, como anteriormente referido, baseada no estabelecido na ficha UIC719-R, substituída no ano 2020 pela nova *International Railway Solution* onde, para além de outros aspetos, foi revista a classificação de solos  $QS_i$  através da introdução de novos critérios de classificação, em particular a classificação dos materiais segundo a Norma Europeia EN 16907-2 *Earthworks-Part 2: Classification of materials*, e aferidas as recomendações em termos de  $E_{v2}$  e  $E_{v2}/E_{v1}$  no topo das camadas de leito de via, sub-balastro e plataforma de terraplenagens.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DA PLATAFORMA DE VIA

### 2.1 Plano de prospeção para auscultação da plataforma

Para a caracterização da atual plataforma ferroviária, foi desenvolvida uma campanha de prospeção e ensaios que englobou a execução de um conjunto de poços de auscultação da plataforma de via, PAV, ensaios de carga com placa, ECP, penetrómetros dinâmicos ligeiros e colheita de amostras remexidas para execução de ensaios de identificação.

Durante a execução da escavação dos poços foram medidas as espessuras de balastro limpo e contaminado, referenciadas à base da travessa, e descritos os materiais ocorrentes ao nível da plataforma. Sob a plataforma, isto é, abaixo do balastro, ou do balastro contaminado caso existisse, foram realizados os ensaios de placa e os penetrómetros dinâmicos ligeiros. Por fim, em laboratório, as amostras colhidas foram sujeitas a ensaios para determinação da curva granulométrica, densidade das partículas sólidas, teor em água, equivalente de areia e valor de azul de metileno.

A seleção das zonas a caracterizar foi realizada de forma criteriosa, em virtude dos condicionalismos existentes, em particular os relacionados com a exploração. Os trabalhos de prospeção, realizados com equipamento carrilado, desenvolveram-se unicamente em interdição de via, durante a noite, devendo no final do período de trabalhos estar a via apta à passagem das circulações. Tal facto levou a que os trabalhos se prolongassem durante períodos de tempo maiores, cerca de um poço por noite, o que nem sempre se coadunou com os prazos de execução dos estudos. Por forma a suplantar esta questão, tentou-se otimizar as quantidades de trabalho, mantendo uma distribuição relativamente homogénea dos PAV ao longo do traçado, dando, contudo, prioridade às zonas onde os relatórios de manutenção e o levantamento da qualidade de via denunciavam problemas, eventualmente, relacionados com a plataforma.

### 2.2 Resultados obtidos

Os poços de auscultação da plataforma de via revelaram, na maioria dos casos, a existência de dois níveis de balastro, um designado por balastro contaminado, associado à contaminação do balastro com material fino, e outro designado por balastro limpo onde, como o próprio nome indica, não existam sinais de contaminação por material fino.

Ao longo do troço em análise os PAV executados indicaram uma espessura de balastro contaminado variável entre 10 e 38 cm, com exceção dos troços limitados pelos pontos quilométricos 0+700-6+000, 63+500-70+000 e 89+000-99+300 nos quais os poços abertos não intersetaram este tipo de materiais.

O balastro limpo, ocorrente sobre o anterior, apresentou uma variação de espessura entre 10 e 60 cm, estando na grande maioria dos casos acima do mínimo de 30cm, referenciados à base da travessa.

Da análise conjunta dos resultados, constatou-se uma ligeira tendência para valores mais reduzidos, parte deles abaixo de 30 cm, entre os Pk 0+700 e 4+900 e entre os Pk 15+700 e 41+550. Em contraponto, após o Pk 55+000 as espessuras de balastro apresentaram-se consistentemente acima de 30 cm, cenário este observado até ao final do troço em estudo, cerca do Pk 123+000.

No que se refere aos materiais constituintes da camada de balastro concluiu-se, tanto com base nos reconhecimentos geológicos de superfície, como com base nos poços realizados, que esta é, em regra geral, de natureza granítica, verificando-se muito pontualmente a existência de alguns fragmentos de natureza calcária.

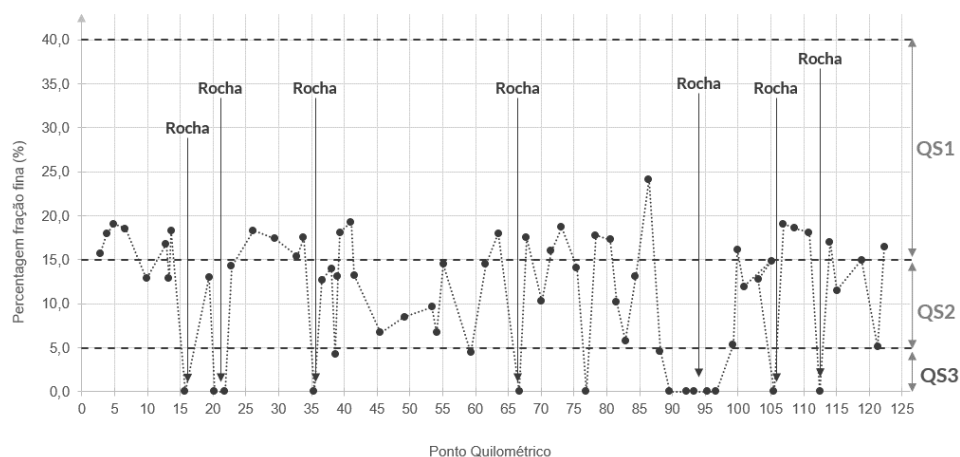
Os materiais existentes ao nível do leito de via teórico, na maior parte dos casos abaixo do balastro contaminado, tratam-se de solos de alteração de origem granítica (saibros), sendo constituídos por grandes quantidades de feldspato, moscovite e biotite, como denunciam os valores de densidade de partículas sólidas, e quartzo em menores quantidades, facto este resultante da natureza monzonítica do maciço rochoso existente. Sob ponto de vista granulométrico, na generalidade dos casos, tratam-se de areias médias a grossas, exibindo frações finas variáveis entre 5 e 25%.

Segundo a Classificação Unificada de Solos, cerca de 75% das amostras colhidas são areias siltosas, da classe SM, que se caracterizam por boa trabalhabilidade e baixa compressibilidade quando saturadas e compactadas. Ainda que estes materiais tenham presença generalizada ao nível do leito de via, observou-se, entre os Pk 45+500 e 54+100, uma divergência para materiais das classes GP-GM, SW-SM e SP-SM, caracterizados por razoável a excelente trabalhabilidade e compressibilidade baixa a desprezável quando saturados e compactados.

A classificação GTR, aplicada considerando o índice de Plasticidade, IP, dos materiais e a dimensão da fração que passa os peneiros nº200 e nº40, indica a predominância de solos de classe B5, cerca de 60%, correspondentes, segundo a mesma classificação, a solos insensíveis à presença de água, tendo ainda sido identificados solos das classes D1, D2 e B2.

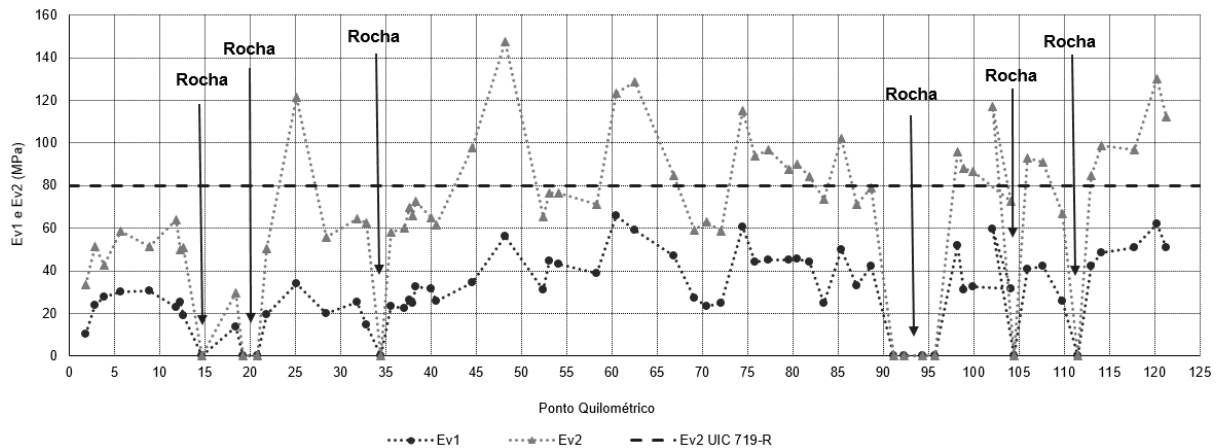
De acordo com a Classificação para Fins Rodoviários os materiais ensaiados são maioritariamente solos A-1-b(0), cerca de 85%, enquadrando-se os restantes na classe A-1-a(0), em qualquer um dos casos com boas características para aplicação ao nível do leito de via, segundo a mesma classificação.

Por fim, da aplicação da classificação proposta nas recomendações UIC719-R (Figura 1), definida especificamente para fins ferroviários, concluiu-se que cerca de 80% dos materiais ocorrentes nas zonas prospetadas constituem solos do tipo QS2 ou QS1 (qualidade média ou medíocre), ocorrendo os materiais QS3, isto é, de boa qualidade, apenas em cerca de 20% dos PAV executados. Esta classificação, por via da sua exigência no que se refere ao teor em finos, restringe grandemente o espectro de aplicabilidade dos materiais no leito de via. Em suma, a utilização da classificação especificada na ficha UIC 719-R coloca no grupo dos solos desadequados um conjunto de materiais que, segundo outras classificações, apresentariam adequadas características para materializarem a camada de leito de via. Tal facto é bastante evidente no presente caso se se compararem as diferentes classificações. É clara e amplamente reconhecida a adequabilidade dos solos SM, A-1-a(0) ou A-1-b(0) para no leito de via, todavia os materiais com esta classificação recaem frequentemente dentro das classes QS2 ou QS1 com as quais a obtenção de uma plataforma P3, dita de boa qualidade, não é possível.



**Fig.1. Percentagem de finos dos materiais ocorrentes nos poços realizados ao longo do traçado**

No que concerne ao módulo de deformabilidade no segundo ciclo de carga, verificou-se um certo padrão para valores inferiores a 80 MPa na primeira metade do traçado, isto é, até ao Pk 61+000, passando depois a cumprir o Ev2 mínimo a partir daquele ponto quilométrico, salvo raras exceções (Figura 2).



**Fig.2. Módulo de deformabilidade no primeiro e segundo ciclo de carga ao longo do traçado**

Os valores mais elevados associam-se em grande parte aos troços alvo de total modernização no final do século XX, designadamente entre o Pk 75+500 e o final do troço em estudo, onde os valores obtidos se situaram entre 80 e 150 MPa. Por outro lado, os troços mais críticos foram identificados com maior significado no primeiro e segundo terço do traçado, com claro adensamento ao longo do primeiro, limitado pelos Pk 0+000 e 44+800. Neste troço os valores foram objetivamente deficientes, da ordem dos 40 a 60 MPa, chegando ao mínimo de 28 MPa cerca do Pk 19+000.

Os resultados do ensaio de penetrómetros dinâmicos ligeiros revelaram uma camada superficial com espessura variável entre 0,10 e 0,40 m, abaixo da qual o equipamento esgota com frequência a sua capacidade ou, nalgumas situações, ocorre uma diminuição na resistência à penetração. No primeiro caso, nas zonas em escavação, tal facto estará naturalmente relacionado com a interseção do maciço rochoso mais são. Nas zonas em perfil misto ou aterro, o esgotamento da capacidade do equipamento será resultado ou da interseção do substrato rochoso, muito alterado ou não, já que estamos em presença de um equipamento ligeiro, ou, por outro lado, da ocorrência ao nível da nega de um bloco rochoso de maiores dimensões que impossibilita o avanço da ponteira.

### 3 ZONAMENTO

#### 3.1 Critérios

Para obtenção do zonamento da atual plataforma, o gabinete projetista definiu um conjunto de critérios hierarquizados a considerar para a definição das diferentes classes de zonamento. A base de partida foi o especificado na ficha UIC 719-R, em particular a tipologia dos materiais ocorrentes ao nível da camada de leito de via teórica, a que se somou o índice de qualidade de via (QN)<sup>1</sup> e os dados disponíveis nos relatórios de manutenção. Preferencialmente, o zonamento foi definido diretamente a partir dos elementos obtidos na prospeção. Não obstante, tratando-se estes de elementos discretos, cuja representatividade não podia ser garantida ao longo de todo o traçado, recorreu-se, como segundo critério, aos restantes elementos disponíveis no relatório de manutenção. Este documento, fornecido pelo gestor da infraestrutura, compila a informação recolhida no decorrer das inspeções visuais efetuadas a pé à via e os elementos recolhidos através de campanhas de recolha de dados através de equipamento carrilado de inspeção de via. Neste contexto destaca-se em particular o índice de qualidade de via, função do nivelamento longitudinal, alinhamento e velocidade máxima permitida, e a presença de

<sup>1</sup> Trata-se de um índice de qualidade de uma via férrea que estabelece três níveis, QN1, QN2 e QN3, definidos em função da velocidade máxima de circulação, do nivelamento longitudinal e do alinhamento.

fenómenos de bombagem de finos e de contaminação do balastro, fosse este detetado visualmente ou identificada através do georadar instalado no veículo de inspeção.

Como critério de projeto, ainda que esta questão não se refletisse diretamente na classificação da plataforma, assumiu-se que os materiais ocorrentes ao nível da fundação apresentariam características idênticas aos materiais da plataforma, ou seja, que para o pior cenário de projeto, a fundação do leito de via seria feita sobre materiais idênticos aos da plataforma, hipótese esta que se validou no decorrer dos reconhecimentos geológicos de superfície.

A classificação propriamente dita foi então definida à semelhança do especificado nas recomendações UIC 719-R, dividindo-se em três grandes classes, uma de boa qualidade, P3, outra de qualidade média, P2, e uma terceira medíocre, P1. Relativamente à classe P2 optou-se, no decorrer do projeto, por proceder a uma adaptação da Classificação UIC, efetivada pela criação de duas subdivisões para a classe em causa. Assim, onde a classe de plataforma se enquadrava dentro dos parâmetros de P2, segundo a UIC 719-R, e o módulo de deformabilidade  $E_{v2}$  era inferior a cerca de 80 MPa, convencionou-se chamar zonas plataforma tipo P2-. Por outro lado, nas zonas onde a plataforma era do tipo P2 e onde o módulo de deformabilidade  $E_{v2}$  era superior a cerca de 80 MPa convencionou-se chamar plataformas P2+.

No quadro 1 sintetizam-se os critérios adotados para a definição das diferentes classes de plataforma, adaptados do proposto nas recomendações UIC719-R.

Quadro 1. Critérios estabelecidos para a classificação da plataforma

Classe de Plataforma	Critérios
P1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solos de tipologia QS1</li> <li>• Zonas QN3</li> </ul>
P2-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solos de tipologia QS2, em aterro, sem possibilidade de melhoria das condições hidrogeológicas.</li> <li>• Zonas QN2 ou com eventuais problemas de bombagem de finos</li> <li>• Solos de tipologia QS2 com possibilidade de melhoria das condições hidrogeológicas, mas com <math>E_{v2} &lt; 80</math> MPa</li> <li>• Solos de tipologia QS3, mas com <math>E_{v2} &lt; 80</math> MPa</li> </ul>
P2+	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solos de tipologia QS2 em escavação com possibilidade de melhoria das condições hidrogeológicas através da introdução de drenagem profunda e com <math>E_{v2} &gt; 80</math> MPa</li> <li>• Solos de tipologia QS2 em aterro com <math>E_{v2} &gt; 80</math> MPa</li> </ul>
P3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solos de tipologia QS3 com <math>E_{v2} &gt; 80</math> MPa</li> <li>• Zonas QN1</li> </ul>

### 3.2 Resultados

Com base nos elementos anteriormente referidos definiu-se o zonamento da plataforma, do qual resultou uma predominância da plataforma P3, sobretudo devido às zonas de trincheira rochosa, onde a camada existente abaixo da cota do balastro apresenta reduzida espessura e onde o objetivo primordial era garantir uma superfície de apoio

regular para a superestrutura. Esta camada, em virtude da sua reduzida espessura, tem um baixo contributo para a deformabilidade da plataforma.

As zonas classificadas dentro das classes P2 e P1 são essencialmente enquadradas em perfis mistos ou de aterro, onde os materiais ocorrentes abaixo do balastro correspondem a solos enquadrados nas classes QS2 e QS1.

No Quadro 2 apresenta-se a síntese da distribuição das várias classes de plataforma ao longo do troço ferroviário em estudo, com indicação das extensões totais onde ocorrem os diferentes tipos de classe de plataforma. Este quadro reflete o zonamento da linha existente após retirados os troços abandonados e substituídos por variantes, onde a plataforma atual será abandonada na totalidade. O zonamento alcançado permitiu concluir que a plataforma de via correspondia, em cerca de 72% à classe P3, ou seja, plataforma de boa qualidade, sendo os restantes 28% incluídos nas restantes classes, isto é, P1, P2+ e P2-.

Quadro 2. Zonamento da plataforma

Classe de Plataforma	Extensão (m)	Percentagem (%)
P1	8862	7
P2-	15631	13
P2+	9265	8
P3	87724	72
Totais	121481	100

## 4 TRATAMENTO DE PLATAFORMA

Com base no zonamento obtido foi possível definir as zonas alvo de tratamento da plataforma, considerando-se como passíveis de tratamento os troços classificados como P1 e P2-, prevendo-se para o efeito dois tipos de tratamento: escarificação e recompactação dos materiais constituintes do atual leito de via, ou saneamento e substituição dos materiais ocorrentes. O primeiro incidiu nas zonas onde os solos da plataforma, embora enquadrados na classe QS3, tinham um  $E_{v2}$  inferior a 80 MPa, isto é, plataforma P2-. O segundo seria aplicado em todos os restantes casos onde a plataforma fosse P2- e P1.

Ao longo das diferentes fases de estudo, tal como referido anteriormente, foi-se verificando que o tratamento por substituição nas espessuras previstas na UIC719-R, em particular para as plataformas P1, poderia introduzir, em fase de obra, constrangimentos importantes no prazo de execução, razão pela qual tornou clara a necessidade de estudar uma solução alternativa à proposta nas recomendações UIC 719-R. Assim, e com esse objetivo, desenvolveu-se uma análise paramétrica para a qual se consideraram diferentes espessuras de camada de leito de via e fez variar o módulo de deformabilidade.

Nos subcapítulos seguintes apresenta-se a metodologia adotada, baseada nos trabalhos desenvolvidos em Fortunato *et al.* (2001) e Marcelino *et al.* (2006).

### 4.1 Modelação numérica

No âmbito do presente estudo modelou-se o ensaio de carga de placa com recurso ao método dos elementos finitos, adotando-se como metodologia base a apresentada em Fortunato *et al.* (2001) e Marcelino *et al.* (2006). Com esse propósito foi construído um modelo em elementos finitos, no qual se modelaram a fundação, o leito de via e a camada de sub-balastro. No topo do sub-balastro foi modelada uma placa circular, com diâmetro de 600 mm, sobre a qual foi aplicada a carga normativa para o ensaio de placa. Para cada uma das análises numéricas obteve-se o deslocamento vertical, medido ao centro da placa, coincidente com o eixo de axissimetria. Com base nos deslocamentos obtidos foi determinado o módulo de deformabilidade do conjunto sub-balastro, leito de via e fundação.

Os cálculos foram executados no *software* Plaxis 2D v2016.01 considerando um modelo axissimétrico, com uma altura de 5m e uma largura de 10m, e uma malha de elementos finitos composta por 1032 elementos triangulares de 15 nós. No que se refere às condições de fronteira, considerou-se o topo do modelo livre, permitindo deslocamentos verticais e horizontais, restringindo-se os deslocamentos horizontais no limite direito e no eixo de revolução do modelo. Por fim, considerou-se a inexistência de deslocamentos ao nível da base. O carregamento imposto à placa pelo macaco hidráulico foi modelado como uma carga distribuída, aplicada verticalmente e sem excentricidade, correspondente a uma tensão de 250 kPa de acordo com o referido nas normas de referência. O Quadro 3 resume os parâmetros mecânicos considerados para a modelação da placa

Quadro 3 Parâmetros da Placa

Parâmetro	Valor	Unidade
Tipo de comportamento	Elástico linear	-
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,3	-
Rigidez axial ( $EA$ )	$1,0 \cdot 10^8$	$\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Rigidez à flexão ( $EI$ )	$2,08 \cdot 10^6$	$\text{kN} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$

A avaliação do módulo de deformabilidade equivalente foi efetuada através dos assentamentos obtidos sob a placa nas diferentes análises numéricas, sendo o seu valor determinado com base no assentamento da placa de geometria circular, rígida, tendo por base a solução de Boussinesq.

Os materiais constituintes foram modelados através de um modelo constitutivo elástico linear. O estudo recorreu a uma análise paramétrica onde se fizeram variar a espessura e módulo de deformabilidade da camada de leito de via, mantendo-se fixos os parâmetros relativos à fundação e à camada de sub-balastro.

Os parâmetros adotados foram considerados tendo como referência valores disponíveis na bibliografia de referência, designadamente Khanal (2013), UIC (2008), Marcelino *et al.* (2006) e Fortunato (2005). apresentando-se no Quadro 4 o resumo dos valores adotados nas análises numéricas efetuadas.

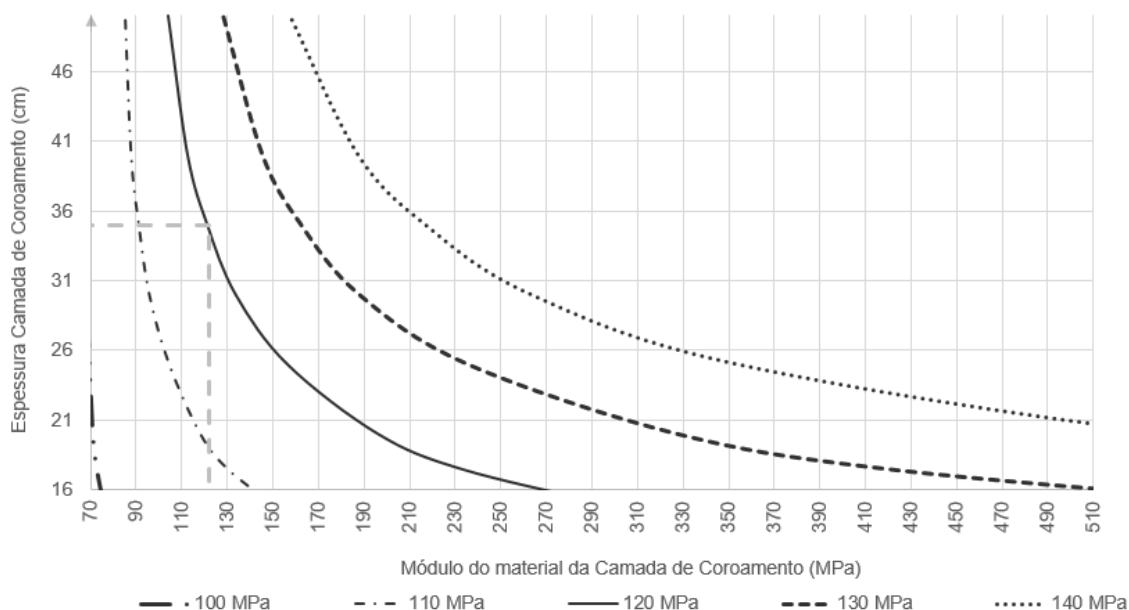
Quadro 4. Parâmetros dos materiais

	Sub-balastro	Leito de via	Fundação	Unidades
Tipo de comportamento	Elástico linear	Elástico linear	Elástico linear	-
Espessura	0,15	0,15 – 0,35	4,65 – 4,85	m
Peso Volúmico ( $\gamma_h$ )	19	21	19,5	$\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,3	0,3	0,3	-
Módulo de deformabilidade ( $E_i$ )	300	70 - 450	60	MPa

## 4.2 Resultados obtidos

Para cada uma das 128 análises numéricas foi obtido o assentamento sob a placa,  $u$ , para diferentes espessuras e módulos de deformabilidade de camada de leito de via. Com base nestes resultados, obtidos da aplicação da metodologia proposta em Fortunato *et al.* (2001), foi construído um ábaco de dimensionamento que permite avaliar e determinar, em função do módulo de deformabilidade dos materiais que constituem a camada de leito de via, qual a espessura a adotar para aquela camada de modo a satisfazer um determinado módulo de deformabilidade equivalente ou global no topo do sub-balastro. Este ábaco de dimensionamento, apresentado na Figura 3, tem por pressuposto base que a camada de sub-balastro apresenta 15 cm de espessura e que o módulo de deformabilidade do sub-balastro e da fundação são de 300 MPa e 60 MPa, respetivamente.

Considerando o valor normativo para o módulo de deformabilidade a obter no topo do sub-balastro, isto é 120 MPa, foi adotada a curva apresentada a cheio na figura anterior. Conservativamente, tendo em consideração que as condições verificadas em obra podem diferir das consideradas no presente estudo, seja por questões ligadas aos próprios materiais, seja por questões ligadas à compactação, considerou-se prudente a adoção de um valor de módulo de deformabilidade para os materiais que compõem a camada de leito de via da ordem dos 120-130MPa, daí resultando a necessidade desta camada ter uma espessura de 0,35m.



**Fig.3. Ábaco de dimensionamento da camada de leito de via, para fundação com  $E=60$  MPa, sub-balastro com 0,15m de espessura e  $E=300$  MPa**

## 5 NOTAS FINAIS

A plataforma de via tem uma grande influência no comportamento da superestrutura ferroviária, pelo que o seu adequado desempenho é fundamental para evitar deficiências na superestrutura, em geral denunciadas pelo alinhamento e nivelamento dos carris.

A obrigatoriedade de garantir uma plataforma de boa qualidade, ou seja, da classe P3, levou à necessidade de estabelecer um zonamento específico com o objetivo de identificar as zonas onde seria necessário reforçar ou tratar o atual leito de via. Este zonamento foi definido de forma ponderada, tendo como base a classificação proposta na ficha UIC 719-R, a qual foi adaptada através da introdução de um conjunto de critérios específico para que esta melhor se ajustasse ao caso de uma via férrea existente. Assim, para além da tipologia dos materiais constituintes do leito de via e da sua fundação, parâmetros base para aquela classificação, foram considerados ainda os valores de  $E_{v2}$ , o índice de qualidade de via, QN, e relatórios de inspeção. Estes elementos adicionais permitiram obter um zonamento em contínuo, mais adaptado ao cenário de uma linha existente, onde as questões relacionadas com a baixa densidade de prospeção e, naturalmente, com a sua representatividade, foram minimizados.

Com a definição do zonamento e a posterior análise dos seus resultados ficou evidente para o projetista e para o dono de obra, o peso dos trabalhos de reforço/tratamento de plataforma no faseamento e no prazo de execução do empreendimento. Esta problemática assumia particular importância nos trechos com piores características, isto é, nos troços P1, onde, segundo a ficha UIC 719-R, seria necessário o saneamento de 0,50 m e a substituição por solos de classe QS3 para obtenção de uma plataforma P3. Com o objetivo de reduzir os tempos de execução foi estudada a otimização das espessuras de tratamento, alcançando-se uma espessura de 0,35 m, tanto para plataformas P2- como P1, o que resultou numa redução de cerca de 15 cm nas zonas classificadas como P1. Os estudos de otimização foram desenvolvidos através de metodologias propostas na bibliografia, em particular em



Fortunato *et al.* (2001), considerando um comportamento elástico linear, ainda que existam metodologias mais recentes, designadamente a proposta em Marcelino *et al.* (2006), onde é considerada a não linearidade dos materiais de sub-balastro. Esta última metodologia, ainda que mais atual, não foi aplicada em virtude da caracterização disponível para os materiais não ser, no presente caso, suficiente.

Os trabalhos desenvolvidos permitiram ainda uma ampla discussão da equipa técnica, o que resultou na obtenção de uma metodologia de projeto adaptada às condições particulares de uma ferrovia existente com características muito particulares. O resultado final foi considerado equilibrado, com os tratamentos a incidirem nos troços com antecedentes de comportamento deficiente. Estes estudos revelaram também a existência de um desalinhamento das diferentes classificações geotécnicas para os solos no que respeita à adequabilidade dos materiais para aplicação em camadas de leito de via. Considera-se que esta é uma questão de fulcral importância que deve merecer investigação para trabalhos futuros, tendo ficado claro que o perfil obtido da aplicação da classificação dos materiais segundo a ficha UIC 719-R, face a outras classificações, resulta bastante restritivo. Com efeito, este indica com frequência a inadequabilidade de determinados materiais que, de acordo com outras classificações, resultariam claramente adequados.

## 6 REFERÊNCIAS

1. Fortunato, E.; Pinelo, A. e Mateus da Silva, J., (2001). The strengthening and upgrade of railway infrastructures. Geotechnical aspects, *Proc. XVth ICSMGE*, pp.2069-2072, (3), Istambul. Balkema.
2. Fortunato, E. (2005). Renovação de Plataformas Ferroviárias, Estudos Relativos à Capacidade de Carga. Porto: Uiversidade do Porto-Faculdade de Engenharia
3. Khanal, S. (2013). Backcalculation of Plate Loading Tests using Plaxis 2D and Hardening Soil Model. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology
4. Lavaredas, J.; Mateus, F. e Ferreira, L., (2009). A Geotecnia no Projeto Ferroviário, *FerrXXI*, 33, 34-41
5. Marcelino, J.; Fortunato, E. e Pinelo, A., (2006). Dimensionamento analítico de camada de reforço em plataformas ferroviárias, *III Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia*, Curitiba Brasil.
6. Union Internationale des Chemins de Fer (2008). UIC Code 719R Earthworks and track bed for railways lines. Union Internationale des Chemins de Fer.