

MODELAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE SOLOS TRATADOS COM CIMENTO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Numerical modelling of the behaviour of soils treated by cement on road pavements

José Neves^a, Luís Castro^a, Arsénio Monteiro^b

^a CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal.

^b Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal

RESUMO – A utilização de misturas tratadas com ligantes hidráulicos, mais correntemente com a utilização de cimento, é uma prática na construção de pavimentos semirrígidos e promotora de uma utilização mais sustentável dos recursos locais, sobretudo quando a disponibilidade de materiais é limitada. O principal e inovador objetivo do artigo é analisar de forma mais direta a influência de fendilhamento na resposta estrutural de pavimentos semirrígidos constituídos por camada de solo tratado com cimento e, conseqüentemente, no seu dimensionamento. Com base na modelação numérica pelo método dos elementos finitos, através do programa ADINA, foram estudadas duas estruturas de pavimento com capacidade de carga equivalente, mas caracterizadas pela diferença de espessura da camada superior betuminosa, refletindo metodologias distintas de conceção de pavimentos semirrígidos. Os resultados da modelação permitiram concluir que a espessura da camada betuminosa e a existência de fendas podem influenciar os estados de tensão e deformação na estrutura do pavimento e, conseqüentemente, conduzirem a uma redução da vida útil do pavimento.

ABSTRACT – The use of hydraulically bound mixtures, most commonly using cement, is a practice in constructing semi-rigid pavements promoting the more sustainable use of local resources, especially when the availability of materials is limited. The main and innovative objective of the paper is the direct analysis of the influence of cracking on the structural response of semi-rigid pavements composed of a layer of soil treated by cement and, consequently, on their design. Based on a numerical modelling by the finite element method, through the ADINA software, two pavement structures with equivalent bearing capacity were studied, but characterized by the difference in thickness of the upper bituminous layer, reflecting different design methodologies. The numerical analysis showed that the thickness of the bituminous layer and the existence of cracks could influence the stresses and strains in the pavement structure. Consequently, it leads to a significant reduction in the lifespan of the pavement.

Palavras Chave – modelação numérica, pavimento rodoviário, solo tratado com cimento.

Keywords – numerical modelling, road pavement, soil treated by cement.

E-mails: jose.manuel.neves@tecnico.ulisboa.pt (J. Neves), luis.santos.castro@tecnico.ulisboa.pt (L. Castro)
dudu097@hotmail.com (A. Monteiro)

ORCID: orcid.org/0000-0002-7131-7967 (J. Neves), orcid.org/0000-0002-0523-0265 (L. Castro)

1 – INTRODUÇÃO

As misturas tratadas com ligantes hidráulicos são, por definição, materiais onde o ligante é o responsável pelas características de presa e endurecimento do material através de reação hidráulica, que lhes confere propriedades melhoradas do ponto de vista mecânico, hidráulico, entre outras (CEN, 2013 e 2015). Um dos ligantes mais utilizados tem sido o cimento, mas novas tecnologias de tratamento baseadas em outros tipos de ligante ou mecanismos de reação têm sido investigadas e aplicadas (Hu et al., 2019; Ikeagwuani e Nwonu, 2019). As misturas granulares tratadas com cimento e os solos tratados com cimento (correntemente designados por solo-cimento) são disso exemplo. Apesar do tratamento de materiais ser uma tecnologia tradicional e aplicada desde longa data, as misturas tratadas com ligantes hidráulicos continuam atualmente a ser aplicadas em camadas de base, sub-base e fundação de pavimentos de estradas, aeródromos e outras áreas de circulação de tráfego, como por exemplo, áreas de estacionamento (Liu et al., 2020; Majarrez, 2013; Walters e Edwards, 2009). As especificações associadas a misturas granulares e solos tratados com cimento no âmbito de aplicações rodoviárias estão contempladas nas normas EN 14227-1 e EN 14227-15, respetivamente (CEN, 2013 e 2015).

A construção de pavimentos utilizando misturas granulares ou solos tratados com cimento pode resultar numa opção técnica, económica e ambientalmente mais vantajosa, sobretudo em contexto de obras onde os materiais naturais são escassos, apresentam propriedades deficitárias ou os custos de transporte de materiais de boa qualidade são elevados. Em geral, o tratamento melhora as propriedades dos materiais e, conseqüentemente, beneficia o desempenho da estrutura dos pavimentos ao longo do seu ciclo de vida (Antunes et al., 2016). Com efeito, esta tecnologia tem sido aplicada com sucesso não só em materiais naturais, mas também em resíduos de várias origens (Crucho et al., 2022; Pasetto e Baldo, 2016; Pasetto, 2000; Pérez et al., 2013; Stehlik et al., 2015; Xuan et al., 2010). Esta tecnologia de pavimentação baseada no tratamento de materiais, valorizando os recursos locais e naturais ou resíduos, é uma prática sustentável que ao promover a economia circular, está a contribuir para a implementação dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pela Organização das Nações Unidas no âmbito das infraestruturas de transporte (Gomes Correia et al., 2016; Plati, 2019).

A utilização de solos tratados com cimento em pavimentos semirrígidos é uma prática corrente em muitos países para atender à indisponibilidade local de materiais granulares de boa qualidade. As estruturas de pavimento semirrígido são em geral constituídas por solos tratados com cimento na camada de base e por revestimento superficial betuminoso ou misturas betuminosas na camada superior, em contexto de estrada revestida. A fissuração é o fenómeno mais característico de camadas constituídas por materiais tratados com cimento e que mais pode contribuir para a degradação dos pavimentos semirrígidos. O fenómeno da fissuração é evolutivo ao longo do ciclo de vida do pavimento e é normalmente associado a três fases: a primeira é caracterizada pelo aparecimento inicial de fissuras de retração volumétrica e/ou dessecação superficial inerentes ao próprio processo de hidratação do cimento; na segunda fase surge fissuração devida à ocorrência de tensões de tração na camada, induzidas pelo tráfego, que excedem a resistência do solo tratado com cimento; e na terceira fase ocorre a fissuração por fadiga em estágio mais avançado da passagem acumulada do tráfego. A ocorrência de fissuração conduz à degradação ao longo do tempo das características da camada de solo tratado com cimento como, por exemplo, a diminuição gradual do módulo de deformabilidade. Outra consequência da fissuração é o fenómeno de reflexão de fendas na camada superior em misturas betuminosas, acentuando ainda mais o processo de degradação geral do pavimento semirrígido. Não é possível eliminar o fenómeno de fissuração em pavimentos semirrígidos, incluindo a reflexão de fendas, mas apenas retardar o seu aparecimento e evolução ao longo do tempo adotando práticas de projeto e construção adequadas. No sentido de mitigar o fenómeno da reflexão de fendas e as suas consequências, uma das práticas de muitos países é a de privilegiar a espessura da camada de misturas betuminosas para retardar o seu aparecimento à superfície do pavimento. Outras medidas a aplicar com este objetivo incluem, por exemplo, a

indução de pré-fissuração na camada de solo tratado com cimento e a colocação de interfaces resistentes entre as camadas (Branco et al., 2023).

Na prática corrente do dimensionamento de pavimentos semirrígidos são utilizados modelos de resposta estrutural bidimensionais (2D) baseados no método das diferenças finitas aplicado a um sistema estratificado de múltiplas camadas (como por exemplo o programa BISAR da *Shell International Petroleum Company* (Shell, 1978)). Estes modelos admitem camadas contínuas homogêneas com comportamento elástico linear caracterizado por parâmetros que devem ser adequados o mais possível à sua previsível evolução ao longo do tempo, como é o caso das camadas tratadas. A modelação tridimensional (3D), computacionalmente mais complexa e exigente, permite a consideração de outro tipo de fenómenos que não podem ser devidamente simulados na modelação 2D. É o caso, por exemplo, da consideração de fendas nas camadas tratadas. Na definição de modelos 3D também não se torna necessário assumir o conjunto de hipóteses de comportamento simplificativas que estão na base do desenvolvimento de modelos 2D (por exemplo, existência de axissimetria do carregamento e da geometria da estrutura), o que permite uma modelação mais adaptada às condições reais da estrutura do pavimento em análise (Reis, 2009).

Neste artigo é apresentado um estudo sobre o comportamento de solos tratados com cimento em pavimentos semirrígidos. O estudo é baseado numa análise numérica simplificada, em modelação 3D, de modo a evidenciar a influência da existência de fendas na camada tratada no seu comportamento estrutural, efeito que não é possível ter em conta nos modelos correntes 2D. Na modelação foi utilizado o método dos elementos finitos com o programa ADINA. A análise foi efetuada em dois tipos de estruturas que foram dimensionadas para idênticas condições de fundação e de tráfego, mas que se distinguiram pela espessura da camada de misturas betuminosas refletindo metodologias de conceção diferente (experiência Portuguesa e experiência Francesa para países de clima tropical como é o caso dos países francófonos da África). O efeito foi estudado ao nível dos critérios de dimensionamento mais utilizados neste tipo de pavimentos: fadiga nas camadas ligadas (camadas de solos tratados com cimento e de misturas betuminosas) e deformações permanentes ao nível da fundação. Os resultados da modelação foram analisados em termos da influência no comportamento estrutural dos pavimentos da rigidez global do pavimento (espessura e módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas) e da existência de fendas na camada de solo tratado com cimento em zonas afastadas e próximas das fendas. O objetivo não foi verificar o dimensionamento das estruturas de pavimento, mas sim avaliar o efeito desses fatores no comportamento dos pavimentos, nomeadamente na camada de solo tratado com cimento.

2 – METODOLOGIA

2.1 – Estruturas de pavimento

Neste estudo foram analisadas as duas estruturas de pavimento rodoviário representadas na Figura 1 (camadas e espessuras), concebidas para condições de fundação e de tráfego equivalentes: o Pavimento P1 segundo a experiência Portuguesa (Figura 1a); o Pavimento P2 segundo a experiência Francesa para países tropicais (Figura 1b). Ambas as estruturas foram concebidas para um número equivalente de passagens do eixo-padrão de 80 kN correspondente a 3×10^6 , num período de dimensionamento de 20 anos (JAE, 1995; CEBTP, 1984). Estas estruturas são típicas de pavimentos semirrígidos, constituídas por camada de base em solo tratado com cimento (SC), de espessura 0,20 m, e por camada superior de misturas betuminosas (BB) com espessura total variável: a espessura total é 0,18 m no Pavimento P1 (Figura 1a); a espessura total é 0,04 m no Pavimento P2 (Figura 1b). Admite-se que as misturas betuminosas são fabricadas a quente, do tipo betão betuminoso. De acordo com a experiência nacional, admite-se que o betume do Pavimento P1 é de penetração da classe 35/50. Para o Pavimento P2, atendendo à realidade de alguns países africanos, considera-se que as misturas betuminosas são constituídas por betume de classe de penetração mais

2.2 – Modelação numérica

As estruturas de pavimento representadas na Figura 1 foram modeladas pelo método de elementos finitos utilizando o programa ADINA 9.3 (ADINA, 2023). Este programa foi selecionado pela sua versatilidade na análise de problemas gerais no âmbito da engenharia civil, incluindo o caso de estruturas de pavimento rodoviárias em análises de maior complexidade, como pode ser o caso de pavimentos rígidos e semirrígidos (Monteiro, 2019; Reis, 2009). Este programa permite a realização de modelações numéricas bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D).

Na análise bidimensional foi considerado um modelo axissimétrico, estando o eixo de simetria associado à vertical do carregamento à superfície. A Figura 2a mostra uma das malhas de elementos finitos considerada na modelação 2D. Foram assumidas as seguintes condições de fronteira cinemática da estrutura de pavimento: encastramento deslizante nas fronteiras verticais do pavimento (a translação segundo a direção ortogonal às camadas é permitida) e encastramento perfeito na fronteira horizontal associada à base da estrutura (nenhum deslocamento é permitido). A malha de elementos finitos foi gerada automaticamente, tendo-se utilizado na discretização das camadas do pavimento elementos 2D axissimétricos. Foram consideradas malhas com número crescente de elementos, mas não se consideraram malhas exageradamente refinadas porque, a partir de um determinado grau de refinamento, a melhoria na qualidade dos resultados deixa de ter significado e o peso computacional da análise pode ser muito elevado. De salientar que, apesar do carregamento na prática ser dinâmico (passagem do tráfego), na modelação foi considerado que o carregamento é estático (Monteiro, 2019).

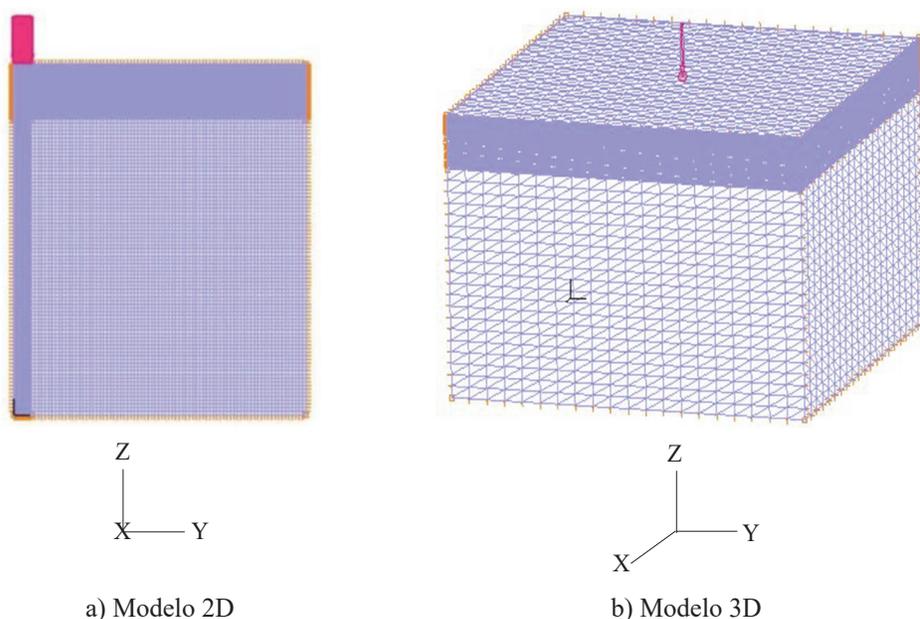


Fig. 2 – Modelação das estruturas de pavimento (Monteiro, 2019).

Foram considerados elementos finitos com 3, 4 e 8 nós tendo apenas, como graus de liberdade, as translações segundo as direções dos eixos coordenados (y , z). De forma a avaliar a discretização mais adequada ao estudo a realizar na modelação 2D, procedeu-se à comparação de resultados do programa ADINA com o programa BISAR 3.0, o qual tem grande utilização em Portugal no dimensionamento de pavimentos (Shell, 1978). Este programa é baseado no método das diferenças finitas aplicado a um sistema estratificado de múltiplas camadas.

O Quadro 2 apresenta os resultados do modelo 2D obtidos com o método de elementos finitos (programa ADINA) e com o método das diferenças finitas (programa BISAR), para as tensões e extensões associadas aos critérios de dimensionamento e calculadas em ambas as estruturas de pavimento apresentadas na Figura 1: máxima extensão horizontal de tração (ϵ_t) na camada de misturas betuminosas (critério de fadiga); máxima tensão horizontal de tração (σ_t) na camada de solo tratado com cimento (critério de fadiga); e máxima extensão vertical de compressão (ϵ_z) no topo da fundação, no Pavimento P1 (Figura 1a), ou da camada de sub-base, no Pavimento P2 (Figura 1b) (critério de deformações permanentes).

O carregamento definido em ambos os programas (ADINA e BISAR) pretendeu ser equivalente ao rodado duplo do eixo padrão de 80 kN (8,2 tf) através de duas abordagens: 1) uma carga correspondente a uma área circular única de raio 0,150 m e tensão de contacto na superfície do pavimento de 570 kPa (equivalente a uma carga total de 40 kN) (Programas ADINA e BISAR); 2) duas cargas correspondentes a áreas circulares, afastadas de 0,105 m, de raio 0,105 m e tensão de contacto na superfície do pavimento de 570 kPa (equivalente a duas cargas de 20 kN) (Programa BISAR). A utilização de uma única carga tem grande vantagem na modelação 2D. No entanto, esta é uma aproximação dado que o carregamento devido ao eixo padrão aplica duas cargas à superfície do pavimento em cada extremidade do eixo. Dadas as vantagens computacionais, foi opção utilizar neste estudo um carregamento caracterizado por apenas uma carga pois assegura o modelo axisimétrico. Foi efetuada também uma análise comparativa com os resultados do programa BISAR em que é mais fácil modelar os dois tipos de carregamento (Quadro 2).

Quadro 2 – Comparação dos resultados obtidos na modelação 2D.

Pavimento	Parâmetros	Programa ADINA			Programa BISAR	
	Número de cargas	1			1	2
	Número de nós	3	4	8	-	-
P1	$\epsilon_t (\times 10^{-6} \mu\text{def})$	25,1	25,6	25,1	23,1	14,0
	σ_t (kPa)	327	328	333	342	298
	$\epsilon_z (\times 10^{-6} \mu\text{def})$	-342	-335	-356	-319	-306
P2	$\epsilon_t (\times 10^{-6} \mu\text{def})$	-44,2	-43,9	-43,5	-45,3	-39,7
	σ_t (kPa)	460	463	468	474	379
	$\epsilon_z (\times 10^{-6} \mu\text{def})$	-468	-466	-471	-475	-345

Legenda dos sinais da tensão (σ) e extensões (ϵ_t e ϵ_z): (+) Tração; (-) Compressão

Tal como seria de esperar, da comparação dos resultados numéricos obtidos com malhas utilizando uma igual densidade de elementos verificou-se que o número de nós considerado em cada elemento (e por consequência o grau de aproximação para o campo de deslocamentos em cada elemento da malha) tem uma ligeira influência na precisão dos resultados e o seu aumento conduz a valores mais próximos dos obtidos pelo método das diferenças finitas. Contudo, no estudo veio a decidir-se adotar elementos de 4 nós, como compromisso entre a qualidade dos resultados e o peso computacional dos cálculos.

Com o programa BISAR foram efetuados cálculos considerando as duas abordagens de carregamento, ou seja, uma e duas cargas de valores 40 kN e 20 kN, respetivamente. A análise dos resultados apresentados no Quadro 2, em comparação com os resultados do programa ADINA (modelo 2D), permite concluir que as duas abordagens de carregamento à superfície do pavimento conduziram a estados de tensão e deformação diferentes. O carregamento baseado numa só carga aplicada originou na generalidade estados de tensão e extensão mais elevados, o que pode conduzir a um dimensionamento do pavimento mais conservativo. Foi possível confirmar que no caso da aplicação de duas cargas os valores de tensão e extensões foram diferentes porque a degradação de

cargas no pavimento seguiu um modelo diferente. Para o caso de carga única, observa-se ainda que a utilização de ambos os programas (ADINA e BISAR) conduziu em geral a resultados similares.

Na modelação 3D consideraram-se malhas uniformes tetraédricas de 4 nós por elemento em todas as camadas do pavimento. Nesta análise foram adotadas as condições convencionais de fronteira cinemática, isto é, encastramento deslizante em todas as quatro fronteiras verticais e encastramento fixo na base do pavimento. O carregamento devido ao eixo padrão aplicado à superfície do pavimento foi considerado equivalente a uma carga única de 40 kN. Na Figura 2b é apresentado um exemplo do modelo 3D utilizado no programa ADINA. Em ambos os tipos de modelação (2D e 3D), considerou-se 2,50 m para o afastamento das fronteiras em relação ao carregamento (distância na horizontal e espessura da fundação).

Em todos os modelos de análise numérica foi admitida a existência de aderência perfeita entre as camadas da estrutura do pavimento. Contudo, na análise estrutural de pavimentos semirrígidos é prática considerar descolamento entre camadas ligadas de natureza diferente. Diferentes modelos de contacto na interface das camadas resultarão em comportamentos estruturais diferentes com implicações distintas ao nível do dimensionamento dos pavimentos. Em relação ao estudo de presente artigo, atendendo a que o objetivo é a comparação relativa de comportamentos entre as duas estruturas de pavimento, optou-se por fazer a simplificação computacional de considerar apenas o modelo de aderência perfeita entre todas as camadas.

A aproximação pelo método dos elementos finitos não permite satisfazer localmente as condições de equilíbrio, tanto no domínio como também nas fronteiras estáticas e nas fronteiras entre elementos. Como consequência, existem normalmente descontinuidades nos campos de tensões e deformações entre elementos adjacentes. Para reduzir estas descontinuidades, foi considerado um processo de regularização da solução (implementado no programa ADINA) que permite obter campos contínuos (tanto de tensões como de deformações).

Para cada uma das estruturas foi efetuada a modelação numérica de forma a avaliar a influência de alguns fatores nos principais problemas estruturais que se colocam aos pavimentos semirrígidos e que são a fadiga por tração da camada de solo tratado com cimento, conducente a fendilhamento, e a deformação permanente ao nível da fundação do pavimento. Foi considerado ainda o fenómeno de fadiga por tração da camada de misturas betuminosas, que pode existir nos casos em que esta camada apresente maior espessura. Assim, a análise de resultados na modelação numérica foi estabelecida para as tensões e extensões associadas aos principais critérios de dimensionamento dos pavimentos semirrígidos (estados limites últimos) já referidos anteriormente a propósito dos resultados apresentados no Quadro 2:

- Critério de fadiga na camada de misturas betuminosas, utilizando a máxima extensão horizontal de tração na base da camada (ϵ_t).
- Critério de fadiga na camada de solo tratado com cimento, através da máxima tensão horizontal de tração na base da camada (σ_t).
- Critério de deformações permanentes na fundação, com base na máxima extensão vertical de compressão no topo da fundação, no Pavimento P1 (Figura 1a), ou da camada de sub-base, no Pavimento P2 (Figura 1b) (ϵ_z).

Com base nestes critérios, procurou-se avaliar a influência da rigidez da camada de misturas betuminosas e da existência de fendas na camada de solo tratado com cimento no comportamento estrutural dos pavimentos selecionados neste estudo (Figura 1). Com efeito, estes são os principais fatores que se podem colocar à conceção e dimensionamento de pavimentos semirrígidos e que se procurou analisar neste artigo. A análise do efeito da existência de fendas foi efetuada a dois níveis: fendas apenas na camada de solo tratado com cimento; fendas quer na camada de solo tratado com cimento quer também na camada de misturas betuminosas devido ao fenómeno de reflexão. Em qualquer caso, a consideração da presença de fenda foi modelada de forma simplificada. Na realidade, em pavimentos semirrígidos, o fenómeno de fendilhamento é mais generalizado e progressivo ao longo do tempo.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 – Influência do modelo de análise estrutural

A decisão pela utilização do modelo 2D ou 3D é também importante pelo impacto computacional que pode ter, em detrimento de se obter informação adicional considerada relevante para o estudo em causa. Na Figura 3 são apresentados resultados da modelação 2D e 3D para ambas as estruturas de pavimento em análise (Figura 1): modelo 2D do Pavimento P1 (P1_2D); modelo 3D do Pavimento P1 (P1_3D); modelo 2D do Pavimento P2 (P2_2D); modelo 3D do Pavimento P2 (P2_3D). A figura mostra, em função do número de graus de liberdade considerados na modelação, a evolução dos resultados obtidos para a extensão horizontal por tração na base da camada de misturas betuminosas (Figura 3a), para a tensão horizontal na base da camada de solo tratado com cimento (Figura 3b) e para a extensão vertical no topo da fundação (Figura 3c).

Os resultados obtidos com as várias malhas 2D mostram que em geral a partir da terceira discretização os valores convergiram e que um maior número de graus de liberdade na malha não conduziu a melhores resultados. É também visível que as malhas com elementos 3D envolvem um número muito superior de graus de liberdade, o que torna as análises consideravelmente mais pesadas do ponto de vista computacional. No caso do modelo 3D é ainda possível observar uma convergência mais lenta que no caso do modelo 2D. De notar que na Figura 3a se observa um comportamento não esperado na modelação tridimensional com a malha mais refinada. Em geral, mesmo para as malhas tridimensionais envolvendo um maior número de graus de liberdade, verificou-se que a solução ainda não convergiu. Se tivessem sido consideradas malhas com um número crescente de graus de liberdade, teria sido possível melhores resultados. Essas malhas não foram consideradas nas análises subsequentes, não só porque os modelos daí resultantes ficariam demasiado pesados do ponto de vista computacional, como também porque os resultados obtidos já foram suficientemente próximos dos resultantes do modelo 2D (ainda que com valor ligeiramente superior). Esta conclusão reforça a vantagem de se considerar sempre que possível o modelo 2D na análise de estruturas de pavimentos. A modelação tridimensional só se justificará em princípio quando se pretenderem considerar efeitos que não podem ser adequadamente simulados com modelos bidimensionais (caso da existência de fendilhamento) ou quando se deixam de verificar as condições que permitem a adoção das hipóteses simplificativas que estão na base da construção de modelos 2D (como por exemplo a existência de axissimetria).

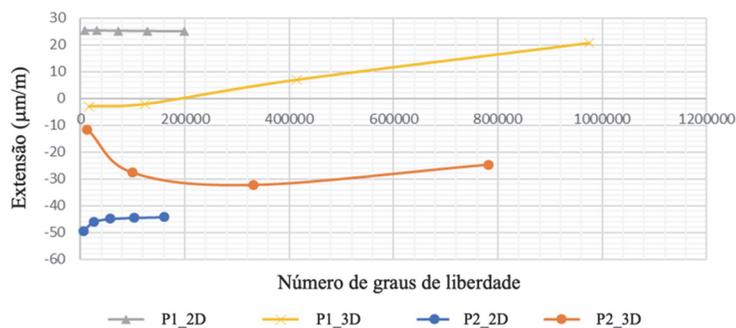
3.2 – Influência da rigidez global do pavimento

Tal como já foi referido, umas das medidas para retardar o fenómeno da reflexão de fendas da camada de solo tratado com cimento para a camada de misturas betuminosas é aumentar a espessura da camada superior. Tal medida resulta necessariamente num aumento da rigidez global da estrutura do pavimento com impacto no seu comportamento estrutural. É este o caso do Pavimento P1 onde é maior a espessura da camada de misturas betuminosas, por oposição ao Pavimento P2 (Figura 1).

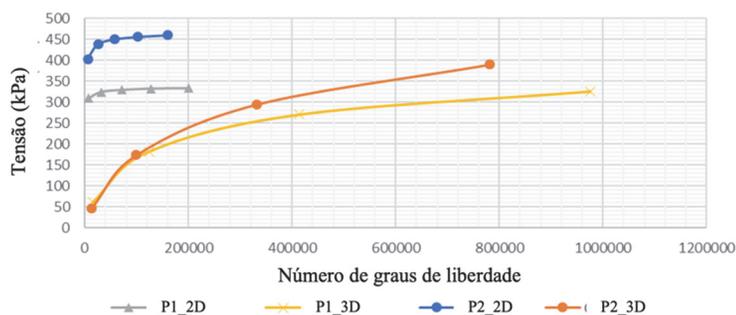
Os resultados do Quadro 2 obtidos por modelos 2D já permitiram constatar que os pavimentos, embora concebidos para atender a condições de tráfego e de fundação equivalentes, apresentam comportamento estrutural diferente. Pela maior espessura da camada superior em misturas betuminosas, o Pavimento P1 já apresentou extensões horizontais de tração na base dessa camada (ϵ_t), embora ainda de valor bastante reduzido para dar relevância ao critério de fadiga das misturas betuminosas. No caso do Pavimento P2, a menor espessura da camada de misturas betuminosas apenas permitiu obter extensões de compressão. Também se constatou que a tensão horizontal de tração na base da camada de solo tratado com cimento (σ_t) e a extensão vertical de compressão no topo da fundação (ϵ_z) foram menores para o Pavimento P1.

Para aprofundar a influência da rigidez global do pavimento, procedeu-se à modelação 3D fazendo variar apenas o módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas: hipóteses

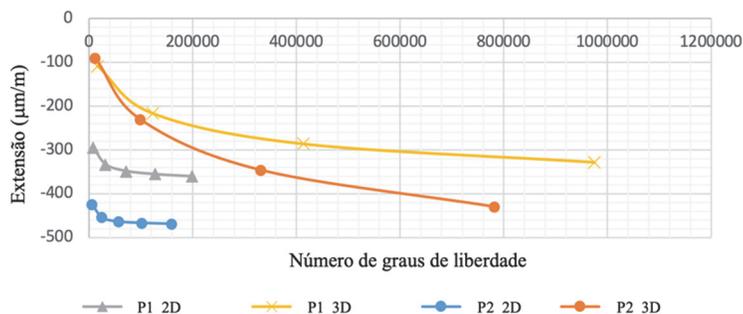
A e B (Quadro 1). A Figura 4 apresenta os resultados obtidos para a extensão horizontal por tração na base da camada de misturas betuminosas (Figura 4a), para a tensão horizontal na base da camada de solo tratado com cimento (Figura 4b) e para a extensão vertical no topo da fundação (Figura 4c). A legenda da figura é a seguinte: P1_A e P1_B correspondem ao Pavimento P1 com módulo de deformabilidade de 1000 MPa (Hipótese A) e 4000 MPa (Hipótese B), respectivamente; P2_A e P2_B correspondem ao Pavimento P2 com módulo de deformabilidade de 1000 MPa (Hipótese A) e 4000 MPa (Hipótese B), respectivamente.



a) Máxima extensão horizontal de tração na camada de misturas betuminosas

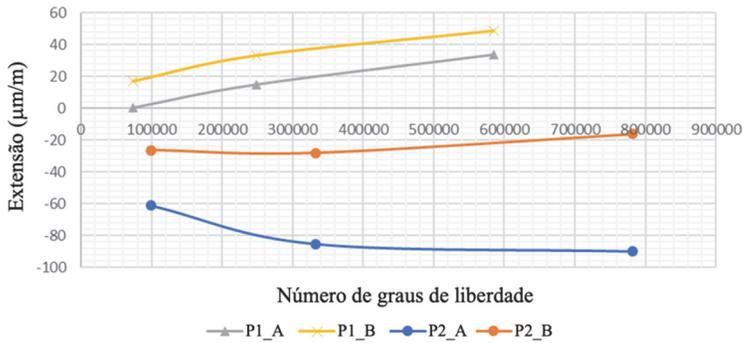


b) Máxima tensão horizontal de tração na camada de solo tratado com cimento

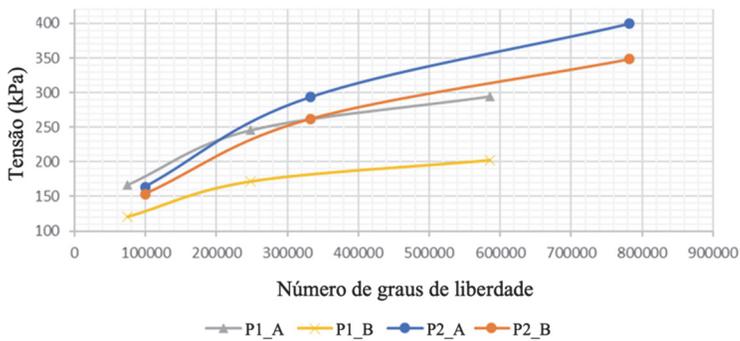


c) Máxima extensão vertical de compressão no topo da fundação

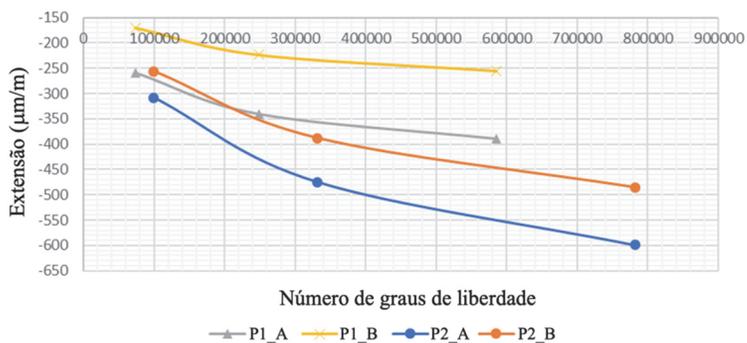
Fig. 3 – Comparação dos modelos de elementos finitos 2D e 3D.



a) Máxima extensão horizontal de tração na camada de misturas betuminosas



b) Máxima tensão horizontal de tração na camada de solo tratado com cimento



c) Máxima extensão vertical de compressão no topo da fundação

Fig. 4 – Influência da rigidez global do pavimento.

Em geral foi possível constatar que a extensão na base da camada de misturas betuminosas foi mais crítica no Pavimento P1. No caso do Pavimento P2, como a camada de misturas betuminosas tem espessura menor, confirmou-se que apenas foram mobilizadas extensões de compressão. Foi ainda possível concluir que no caso do Pavimento P1, a extensão horizontal foi maior na estrutura com um módulo de deformabilidade maior, enquanto no Pavimento P2 aconteceu um

comportamento contrário. Igualmente se verificou que para pavimentos diferentes, mas com módulos de deformabilidade idênticos, a tensão de tração na camada de solo tratado com cimento e a extensão vertical na fundação foram maiores no Pavimento P2 por este apresentar uma espessura da camada de misturas betuminosas menor. Ainda para o mesmo tipo de pavimento, mas com módulos de deformabilidade diferentes, verificou-se que é a estrutura de pavimento com menor módulo de deformabilidade que apresenta tensão de tração na camada de solo tratado com cimento e extensão vertical na fundação maiores, pela razão da estrutura de pavimento ser globalmente mais deformável.

3.3 – Influência de fendas na camada de solo tratado com cimento

De forma a estudar a influência de fendas induzidas na camada de solo tratado com cimento no comportamento estrutural dos pavimentos, com eventual reflexão na camada superior de misturas betuminosas, através da modelação 3D procedeu-se à avaliação das linhas de influência das três grandezas associadas aos critérios de dimensionamento – máxima extensão horizontal de tração na base da camada de misturas betuminosas, máxima tensão horizontal na base da camada de solo tratado com cimento e máxima extensão vertical no topo da fundação – para localizações a meio vão entre fendas (zona afastada da fenda) e a 0,50 m de distância da fenda (zona próxima da fenda). Estas linhas de influência foram estabelecidas para uma carga equivalente ao eixo padrão de 80 kN em movimento. Admitiu-se um espaçamento de 5 m entre as fendas.

Em síntese, procedeu-se ao traçado das linhas de influência para as seguintes três situações de existência de fendas nas camadas dos dois tipos de pavimentos (Figura 1):

- Pavimento de camadas contínuas (sem fendas).
- Pavimento de camada descontínua de solo tratado com cimento (com fendas), e camada contínua de misturas betuminosas (sem reflexão de fendas).
- Pavimento de camada descontínua de solo tratado com cimento (com fendas), e camada descontínua de misturas betuminosas (com reflexão de fendas).

Seguidamente, são apresentados e analisados os resultados das linhas de influência para as situações descritas anteriormente e com o objetivo de analisar o comportamento estrutural do pavimento em zona afastada da fenda e em zona próxima da fenda.

3.3.1 – Comportamento em zona afastada da fenda

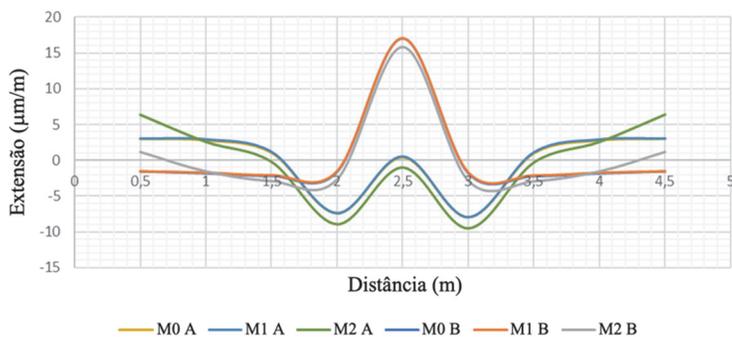
As Figuras 5 e 6 mostram as linhas de influência para zona a meio vão entre fendas – zona afastada da fenda – para ambas estruturas de pavimento em análise (Figura 1): linhas de influência do Pavimento P1 (Figura 5) e linhas de influência do Pavimento P2 (Figura 6).

As linhas de influência foram estabelecidas para as várias grandezas em análise: máxima extensão horizontal de tração na base da camada de misturas betuminosas (Figura 5a e 6a), máxima tensão horizontal na base da camada de solo tratado com cimento (Figuras 5b e 6b) e máxima extensão vertical no topo da fundação (Figuras 5c e 6c). Para cada pavimento foi considerado para a camada de misturas betuminosas os módulos de deformabilidade de 1000 MPa e 4000 MPa (hipóteses A e B do Quadro 1, respetivamente).

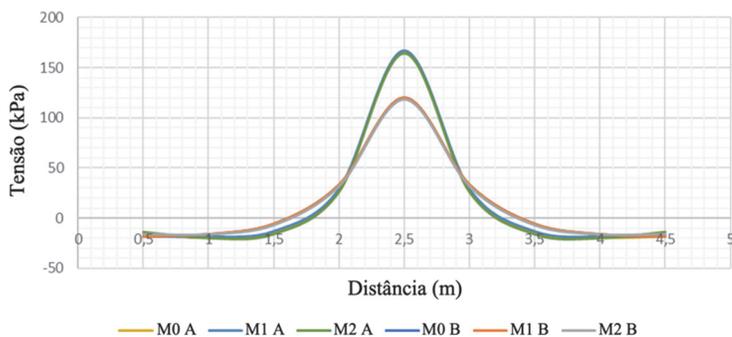
Para a modelação da camada de misturas betuminosas com módulo de deformabilidade de 1000 MPa foram utilizadas as seguintes condições e notações nas Figuras 5 e 6:

- Pavimento de camadas contínuas (sem fendas): M0 A, no caso do Pavimento P1; C0 A no caso do Pavimento P2.
- Pavimento de camada descontínua de solo tratado com cimento (com fendas), e camada contínua de misturas betuminosas (sem reflexão de fendas): M1 A, no caso do Pavimento P1; C1 A no caso do Pavimento P2.

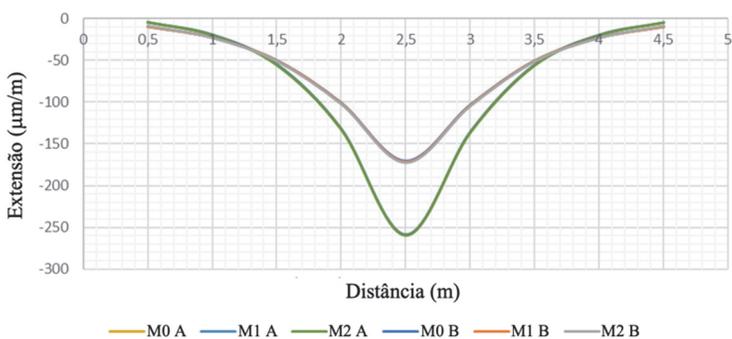
- Pavimento de camada descontínua de solo tratado com cimento (com fendas), e camada descontínua de misturas betuminosas (com reflexão de fendas): M2 A, no caso do Pavimento P1; C2 A no caso do Pavimento P2.



a) Máxima extensão horizontal de tração na camada de misturas betuminosas

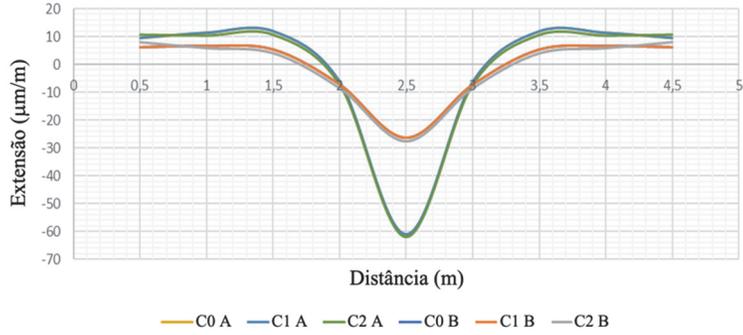


b) Máxima tensão horizontal de tração na camada de solo tratado com cimento

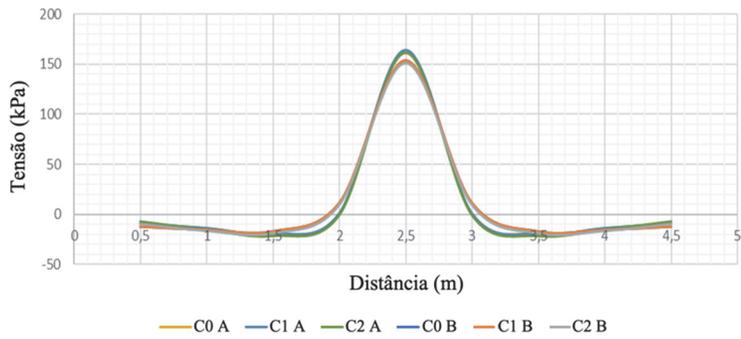


c) Máxima extensão vertical de compressão no topo da fundação

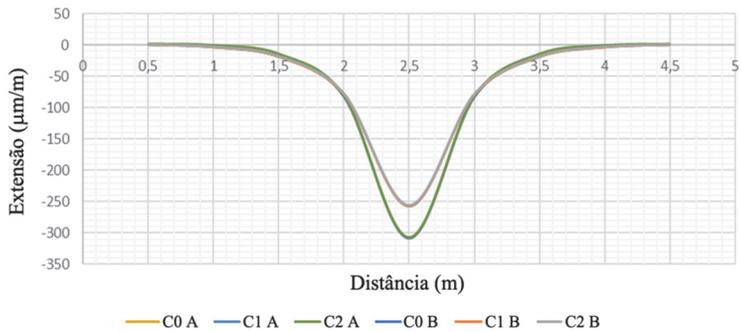
Fig. 5 – Linhas de influência em zona afastada da fenda no Pavimento P1.



a) Máxima extensão horizontal de tração na camada de misturas betuminosas



b) Máxima tensão horizontal de tração na camada de solo tratado com cimento



c) Máxima extensão vertical de compressão no topo da fundação

Fig. 6 – Linhas de influência em zona afastada da fenda no Pavimento P2.

De forma semelhante, para a modelação da camada de misturas betuminosas com módulo de deformabilidade de 4000 MPa foram utilizadas as seguintes condições e notações:

- Pavimento de camadas contínuas (sem fendas): M0 B, no caso do Pavimento P1; C0 B no caso do Pavimento P2.

- Pavimento de camada descontínua de solo tratado com cimento (com fendas), e camada contínua de misturas betuminosas (sem reflexão de fendas): M1 B, no caso do Pavimento P1; C1 B no caso do Pavimento P2.
- Pavimento de camada descontínua de solo tratado com cimento (com fendas), e camada descontínua de misturas betuminosas (com reflexão de fendas): M2 B, no caso do Pavimento P1; C2 B no caso do Pavimento P2.

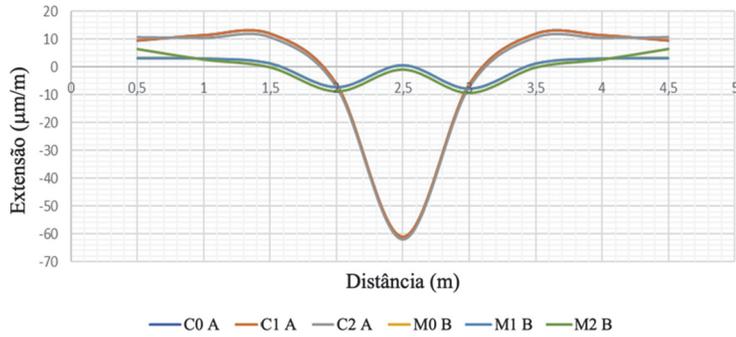
Em geral, da análise do comportamento estrutural ilustrado nos gráficos das Figuras 5 e 6 é possível concluir que, para o mesmo modo de deformabilidade, as linhas de influência são praticamente coincidentes para as três situações analisadas de existência de fendilhamento na camada de solo tratado com cimento e na camada de misturas betuminosas. Isto significa que, nesta zona a influência das fendas não se faz sentir. Este comportamento é expectável, uma vez que as grandezas estão a ser medidas numa zona da estrutura do pavimento suficientemente afastada da zona da fenda. A análise dos mesmos gráficos permite ainda constatar que as extensões e tensão a meio vão são maiores quando o módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas é menor, uma vez que corresponde a um pavimento mais deformável. De notar que essa diferença de comportamento foi atenuada no Pavimento P2 devido à menor espessura da camada de misturas betuminosas, sobretudo para os casos da tensão na base da camada de solo tratado com cimento e da extensão no topo da fundação (Figura 6). No caso do Pavimento P1, a existência de fendas, quer só na camada de solo tratados com cimento quer também quando refletidas para a camada de misturas betuminosas, tem influência na extensão horizontal na base da camada de misturas betuminosa do pavimento a meio vão, tal como se pode confirmar pela análise da Figura 5a. Esta figura mostra que quando se consideram módulos deformabilidade diferentes, a extensão horizontal pode ser de tração (sinal positivo) ou de compressão (sinal negativo), conforme se adotem módulos de deformabilidade de 1000 MPa ou de 4000 MPa, respetivamente.

A Figura 7 apresenta a comparação das linhas de influência para o o Pavimento P1 e o Pavimento P2 (a legenda desta figura é igual à descrita para as Figuras 5 e 6). Para a análise foi utilizado em todos os casos o mesmo módulo de deformabilidade na camada de misturas betuminosas com um valor igual a 1000 MPa. Nos casos da tensão horizontal de tração na camada de solo tratado com cimento (Figura 7b) e da extensão vertical de compressão no topo da fundação (Figura 7c) os comportamentos foram muito similares entre os dois pavimentos. No caso da extensão horizontal de tração na camada de misturas betuminosas (Figura 7a) é possível observar maiores diferenças pois, sendo o módulo de deformabilidade igual, a espessura da camada de misturas betuminosas do Pavimento P1 é significativamente superior. Para este pavimento e quando a carga se encontra a meio vão, a extensão é sempre de tração e atinge o valor máximo.

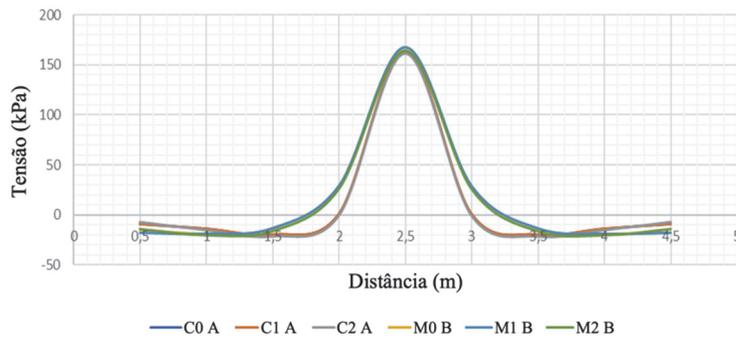
De forma global, é possível concluir que, em geral, os valores das extensões e tensão foram pouco afetados pela existência de fendas induzidas na camada de solo tratado com cimento, mesmo quando elas são refletidas para a camada superiores de misturas betuminosas. Este é um resultado já expectável, tendo em conta que estas as grandezas foram medidas em locais afastados das fendas. Para esses locais, a simplificação da consideração de camadas contínuas e íntegras (sem fendas), como é corrente no dimensionamento de pavimentos semirrígidos, é uma aproximação razoável.

3.3.2 – Comportamento em zona próxima da fenda

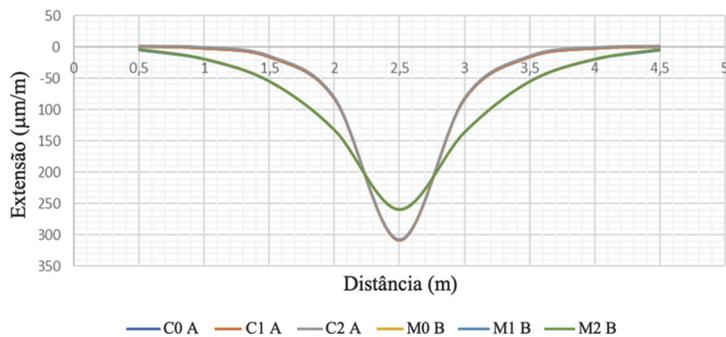
Para a situação em que se procurou analisar as linhas de influência em zona próxima da fenda (por constrangimentos da modelação numérica essa zona localiza-se à distância de 0,50 m), foi adotada uma análise em tudo semelhante à descrita para o caso da análise do comportamento em zona afastada da fenda (secção 3.3.1). Primeiramente foram analisadas as linhas de influência para as duas estruturas de pavimento (Pavimento P1 e Pavimento P2), considerando os critérios de dimensionamento em análise nas várias camadas. Seguidamente, procedeu-se à comparação das linhas de influência para os dois pavimentos admitindo também um módulo de deformabilidade para a camada de misturas betuminosas igual a 1000 MPa.



a) Máxima extensão horizontal de tração na camada de misturas betuminosas



b) Máxima tensão horizontal de tração na camada de solo tratado com cimento

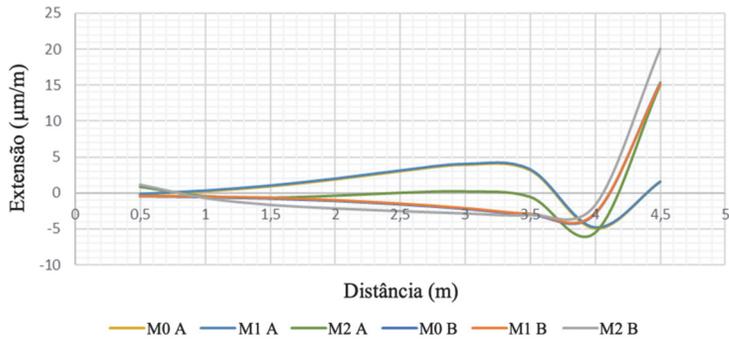


c) Máxima extensão vertical de compressão no topo da fundação

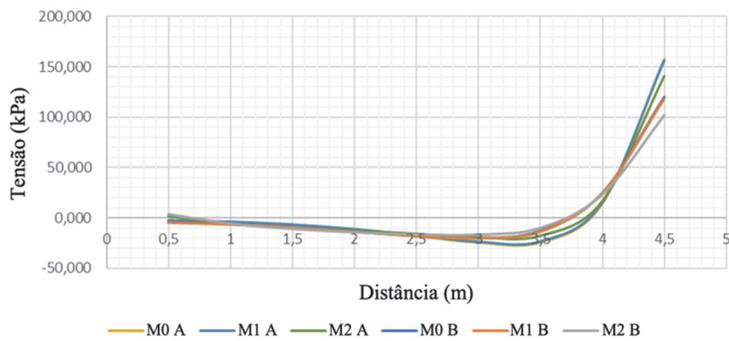
Fig. 7 – Comparação das linhas de influência em zona afastada da fenda entre pavimentos.

As Figuras 8 e 9 mostram as linhas de influência em zona próxima da fenda para as duas estruturas de pavimento: Pavimento P1 (Figura 8) e Pavimento P2 (Figura 9). Igualmente, as linhas de influência foram traçadas para as grandezas em análise: máxima extensão horizontal de tração na base da camada de misturas betuminosas (Figuras 8a e 9a), máxima tensão horizontal na base da camada de solo tratado com cimento (Figuras 8b e 9b) e máxima extensão vertical no topo da

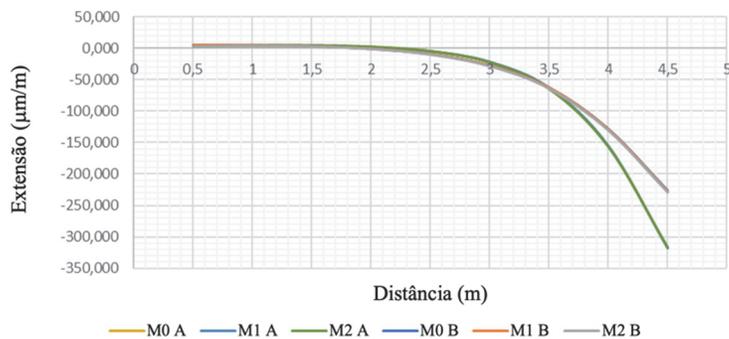
fundação (Figuras 8c e 9c). Da mesma forma, foram considerados os módulos de deformabilidade de 4000 MPa e de 1000 MPa para a camada de misturas betuminosas, correspondentes às hipóteses A e B apresentadas no Quadro 1, respetivamente. A legenda desta figura é igual à descrita para as Figuras 5 e 6 da secção 3.3.1.



a) Máxima extensão horizontal de tração na camada de misturas betuminosas

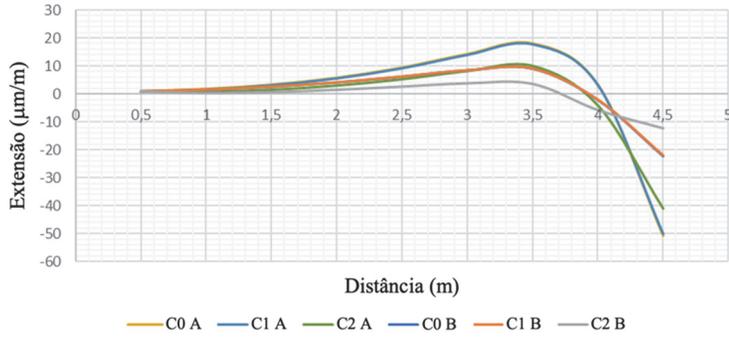


b) Máxima tensão horizontal de tração na camada de solo tratado com cimento

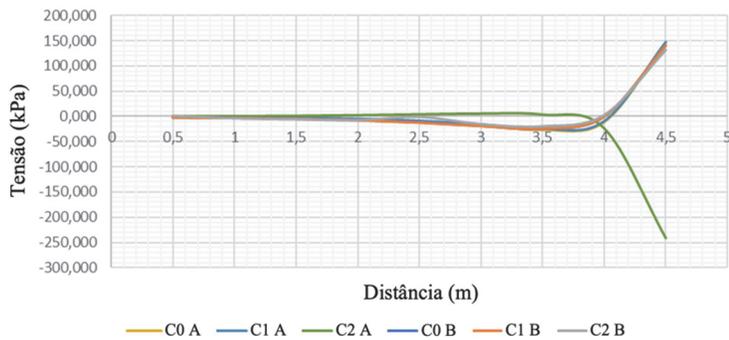


c) Máxima extensão vertical de compressão no topo da fundação

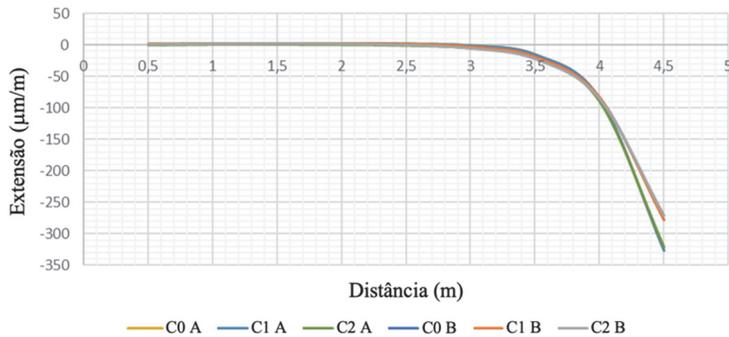
Fig. 8 – Linhas de influência em zona próxima da fenda no Pavimento P1.



a) Máxima extensão horizontal de tração na camada de misturas betuminosas



b) Máxima tensão horizontal de tração na camada de solo tratado com cimento



c) Máxima extensão vertical de compressão no topo da fundação

Fig. 9 – Linhas de influência em zona próxima da fenda no Pavimento P2.

O comportamento evidenciado para a zona próxima da fenda foi similar para ambos os pavimentos e para as várias condições estudadas. Em geral, as linhas de influência não são muito diferentes. Isto significa que a existência de fendas não teve uma influência significativa no

comportamento estrutural dos pavimentos, considerando os diferentes valores de módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas. Também neste caso é possível observar que a extensão vertical de compressão no topo da fundação e a tensão horizontal de tração na camada de solo tratado com cimento apresentaram maiores valores para o pavimento com menor módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas (Figuras 8b, 8c, 9b e 9c). Relativamente à extensão horizontal de tração na camada de misturas betuminosas, como seria de esperar, verificou-se que se obteve os maiores valores no caso dos pavimentos com maior módulo de deformabilidade (Figuras 8a e 9a).

A Figura 10 permite comparar as linhas de influência para os dois pavimentos (a legenda desta figura é também igual à descrita anteriormente para as Figuras 5 e 6) quando se considerou para a camada de misturas betuminosas um módulo de deformabilidade igual a 1000 MPa. Os resultados foram semelhantes para a extensão vertical de compressão no topo da fundação, mas ligeiramente superiores no Pavimento P1 (Figura 10c). De notar a particularidade de não ocorrerem tensões horizontais de tração na camada de solo tratado com cimento do Pavimento P2 para o caso de camada descontínua de solo tratado com cimento (com fendas) e camada descontínua de misturas betuminosas (com reflexão de fendas) (Figura 10b). Também as máximas extensões horizontais de tração na camada de misturas betuminosas ocorreram no Pavimento P1 com a camada descontínua de solo tratado com cimento (com fendas) e camada descontínua de misturas betuminosas (com reflexão de fendas) (Figura 10a).

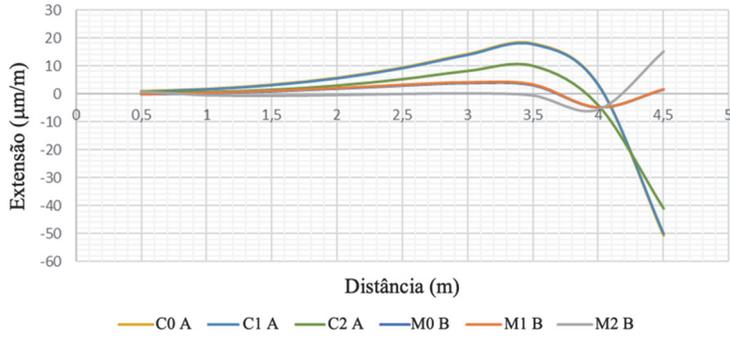
4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo abordou o comportamento de solos tratados com cimento em camada de base de pavimentos semirrígidos, nomeadamente a influência da espessura da camada superior de misturas betuminosas e da existência de fendas no comportamento estrutural.

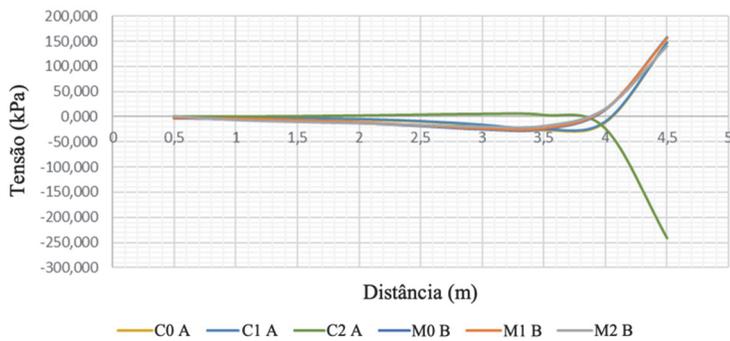
Procedeu-se a uma análise numérica pelo método dos elementos finitos, com base na utilização do programa ADINA, em modelações bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) de duas estruturas de pavimento concebidas de acordo com as metodologias Portuguesa e Francesa para países tropicais para condições equivalentes de fundação e tráfego. Estas estruturas são constituídas por camada de base em solo tratado com cimento e por camada superior em misturas betuminosas. O estudo comparativo das situações analisadas foi efetuado para os estados de tensão e extensão nas estruturas de pavimento: extensão horizontal de tração na camada de misturas betuminosas; tensão horizontal de tração na camada de solo tratado com cimento; e extensão vertical de compressão no topo da fundação. Estas extensões e tensão são correntemente utilizadas no dimensionamento dos pavimentos semirrígidos por estarem associadas aos critérios de fadiga (nas camadas de materiais ligados) e de deformações permanentes (ao nível da fundação do pavimento).

O estudo realizado permitiu confirmar a vantagem computacional de se considerarem modelos 2D na análise de estruturas de pavimentos, sempre que tal seja possível. Com efeito, a maior vantagem da utilização de modelos 2D é a possibilidade de se obterem resultados aceitáveis com malhas envolvendo discretizações com número muito inferior de graus de liberdade quando comparado com malhas de elementos finitos tridimensionais. Por esta razão, o esforço computacional associado a modelos 2D é previsivelmente muito inferior ao associado a modelos 3D. A modelação 3D pode ser justificável quando se pretendem considerar efeitos que não podem ser adequadamente simulados com modelos 2D (como é o caso do fendilhamento) ou quando se deixam de verificar as condições que permitem a adoção das hipóteses simplificativas que estão na base da construção dos modelos 2D. O presente estudo mostrou que a vantagem da modelação 3D foi a simulação da existência de fendas nas camadas do pavimento (efeito ainda não explorado) e o efeito da passagem de um carregamento móvel à superfície.

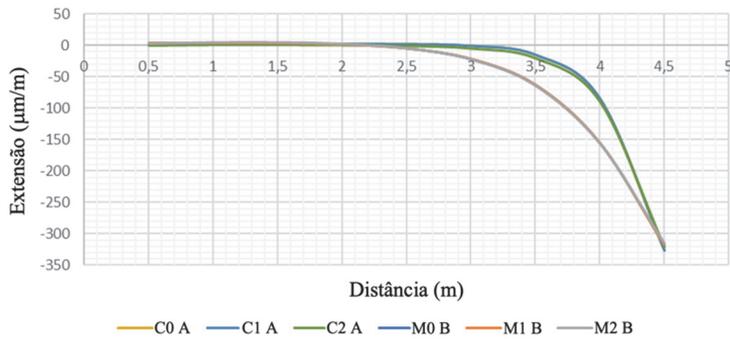
Na análise dos pavimentos com deformabilidade diferente foi observado que, em geral, a extensão vertical de compressão no topo da fundação foi sempre menor no pavimento com maior espessura de camada de misturas betuminosas, favorecendo o critério da deformação permanente.



a) Máxima extensão horizontal de tração na camada de misturas betuminosas



b) Máxima tensão horizontal de tração na camada de solo tratado com cimento



c) Máxima extensão vertical de compressão no topo da fundação

Fig. 10 – Comparação das linhas de influência em zona próxima da fenda entre pavimentos.

Em relação ao critério de fadiga das camadas betuminosas, constatou-se que foi para o pavimento com maior espessura das misturas betuminosas que foi possível mobilizar extensões de tração. Se a isto acrescer um módulo de deformabilidade maior das misturas betuminosas, o efeito pode ser agravado pois as extensões de tração serão também maiores. No caso do critério de fadiga

na camada de solo tratado com cimento, constatou-se que a tensão de tração foi maior no pavimento com camada de misturas betuminosas menos espessa. Se o módulo de deformabilidade das misturas betuminosas for menor, então pode ser maior a tensão de tração na base da camada de solo tratado com cimento devido à maior deformabilidade global da estrutura do pavimento.

No âmbito do estudo das linhas de influência dos estados de deformação e tensão associados aos critérios de dimensionamento dos pavimentos semirrígidos e mobilizados por carga em movimento, foram estudados diferentes casos. As linhas de influência foram avaliadas para duas zonas distintas: (a) zona afastada da fenda; (b) zona na proximidade da fenda. Foram ainda objeto de análise três outras situações: (1) pavimento de camadas contínuas (sem fendas); (2) pavimento de camada descontínua de solo tratado com cimento (com fendas), e camada contínua de misturas betuminosas (sem reflexão de fendas); (3) pavimento de camada descontínua de solo tratado com cimento (com fendas), e camada descontínua de misturas betuminosas (com reflexão de fendas).

Na análise em zona afastada da fenda, constatou-se que o comportamento estrutural do pavimento não foi influenciado pela existência da fenda uma vez que é uma zona suficientemente distante do local da fenda. Foi ainda constatado que no caso das estruturas de pavimento com diferentes módulos de deformabilidade da camada de misturas betuminosas, os valores que se obtiveram para as extensões foram maiores no caso em que o módulo de deformabilidade da camada de mistura betuminosa é menor. Na zona da proximidade da fenda, foi observado que as soluções obtidas com o pavimento de maior espessura da camada de misturas betuminosas foram semelhantes às obtidas no caso dessa mesma espessura ser menor. Também neste caso a extensão vertical na fundação e a tensão horizontal na camada de solo tratado com cimento apresentaram maiores valores para o caso de menor módulo de deformabilidade das misturas betuminosas. Já para a extensão horizontal na camada de misturas betuminosas verificou-se, que foi para o caso do pavimento com maior módulo de deformabilidade que os valores obtidos foram maiores.

O comportamento evidenciado no cenário de existência de fendas mostra que para uma dada estrutura de pavimento se pode ter uma redução da sua vida útil. Ao contrário do que se passa nos pavimentos rígidos (pavimentos de betão), as metodologias correntemente utilizadas no dimensionamento de pavimentos semirrígidos são baseados em modelos 2D (método das diferenças finitas aplicado a um sistema estratificado de múltiplas camadas), tal como nos pavimentos flexíveis, que não permitem considerar a presença de fendas.

Futuramente poderá ser interessante efetuar modelações numéricas com modelos dos materiais de pavimentação diferentes do comportamento elástico linear, como é o caso das misturas betuminosas que tendem a exibir comportamentos mais complexos atendendo à sua viscosidade. O estudo apresentado considerou o modelo de ligação perfeita entre camadas. Assim, para melhor modelar o comportamento do pavimento, também poderá ser importante considerar a hipótese de existir escorregamento e/ou descolamento entre camadas, nomeadamente no contacto com a camada de solo tratado com cimento, que ao ser incluída no modelo de elementos finitos pode obrigar a definir relações constitutivas mais adequadas à modelação da ligação entre camadas adjacentes.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) por meio do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS – Centro de Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade (<https://ceris.pt>).

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADINA (2023). <http://www.adina.com>, consultado em março de 2023.

- Antunes, M. L.; Marecos, V.; Neves, J.; Morgado, J. (2016). *Decision to pavement solutions in road infrastructures based on life-cycle assessment*. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 11(1), pp. 43-52, <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2016.05>.
- Branco, F.; Pereira, P.; Picado-Santos, L. (2023). *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina, Coimbra, Portugal, ISBN: 9789724026480, 388 p.
- CEBTP (1984). *Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux*. Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics, Ministère des Relations Extérieures Coopération et Développement, République Française, ISBN-2-11-084811-1, 157 p.
- CEN (2013). EN 14227-1 – *Hydraulically bound mixtures. Specifications. Cement bound granular mixtures*. European Committee for Standardisation, Brussels.
- CEN (2015). EN 14227-15 – *Hydraulically bound mixtures. Specifications. Hydraulically stabilized soils*. European Committee for Standardisation, Brussels.
- Crucho, J.; Picado-Santos, L.; Neves, J. (2022). *Cement-treated pavement layers incorporating construction and demolition waste and coconut fibres: a review*, International Journal of Pavement Engineering, 23(14), pp. 4877-4896, <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1984475>.
- Gomes Correia, A.; Winter, M.G., Puppala, A.J. (2016). *A review of sustainable approaches in transport infrastructure geotechnics*. Transportation Geotechnics, 7, pp. 21-28, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.03.003>.
- Hu, W.; Shu, X.; Huang, B. (2019). *Sustainability innovations in transportation infrastructure: An overview of the special volume on sustainable road paving*. Journal of Cleaner Production, 235, pp. 369-377, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.258>.
- Ikeagwuani, C. C.; Nwonu, D. C. (2019). *Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 11(2), pp. 423-440, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.013>.
- JAE (1995). *Manual de conceção de pavimentos para a rede rodoviária nacional*. Ex-Junta Autónoma de Estradas, Almada, Portugal.
- Liu, Y.; Su, P.; Li, M.; You, Z.; Zhao, M. (2020). *Review on evolution and evaluation of asphalt pavement structures and materials*. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 7(5), pp. 573-599, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.05.003>.
- Majarrez, F. P. (2013). *Semi-rigid pavement performance and construction techniques for semiarid areas*. Road Materials and Pavement Design, 14(3), pp. 615-637, <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.779307>.
- Monteiro, A. (2019). *Modelação numérica do comportamento das camadas de pavimentos rodoviários constituídas por solos tratados com cimento*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal, 70 p.
- Pasetto, M. (2000). *The re-utilisation of discarded building materials in cement-stabilised layers of road and airfield pavements*. Waste Management Series, 1, pp. 548-566, [https://doi.org/10.1016/S0713-2743\(00\)80066-5](https://doi.org/10.1016/S0713-2743(00)80066-5).
- Pasetto, M.; Baldo, N. (2016). *Recycling of waste aggregate in cement bound mixtures for road pavement bases and sub-bases*. Construction and Building Materials, 108, pp. 112-118, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.023>.

- Pérez, P.; Agrela, F.; Herrador, R.; Ordoñez, J. (2013). *Application of cement-treated recycled materials in the construction of a section of road in Malaga, Spain*. Construction and Building Materials, 44, pp. 593–599, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.034>.
- Plati, C. (2019). *Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review*. Construction and Building Materials, 211, pp. 539–555, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.242>.
- Shell (1978). *Shell Pavement Design Manual: Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic*. Shell International Petroleum Company, 354 p.
- Stehlik, D.; Dasek, O.; Hyzl, P.; Coufalik, P.; Krcmova, I.; Varaus, M. (2015). *Pavement construction using road waste building material – from a model to reality*. Road Materials and Pavement Design, 16, pp. 314–329, <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1029680>.
- Reis, N. (2009). *Análise estrutural de pavimentos rodoviários – Aplicação a um pavimento reforçado com malha de aço*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal, 101 p.
- Walters, C. E.; Edwards, J. (2009). *Increasing the use of hydraulically bound mixtures in construction*. Final report, WRAP, Banbury.
- Xuan, D.; Houben, L. J. M.; Molenaar, A. A. A.; Shui, Z. (2010). *Cement treated recycled demolition waste as a road base material*. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 25(4), pp. 696–699, <https://doi.org/10.1007/s11595-010-0073-4>.