



Avaliação Numérica do Comportamento de Reforços de Pavimento à Reflexão de Fendas

Márcia Rubina Ascensão Freitas

Relatório Final de Projeto apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Novembro 2012

Avaliação Numérica do Comportamento de Reforços de Pavimento à Reflexão de Fendas

Márcia Rubina Ascensão Freitas

Relatório Final de Projeto apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Orientador:

Professor Doutor Manuel Joaquim da Costa Minhoto

Novembro 2012

Agradecimentos

Desejo agradecer em particular:

Ao meu orientador, Professor Doutor Manuel Minhoto, não só pela orientação do presente trabalho, como pela confiança em mim depositada para a sua concretização, pela cedência e indicação de alguma bibliografia relevante para a temática em análise e pela colaboração demonstrada na leitura crítica do documento. Mas acima de tudo, quero agradecer a compreensão, a amizade, o reconhecimento e pelo permanente estímulo que, por vezes, se tornaram decisivos em determinados momentos da elaboração deste trabalho de projeto.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão do IPB, em particular ao Prof. Doutor José Carlos Rufino Amaro, pela disponibilidade dos recursos informáticos utilizados neste trabalho, os quais muito contribuíram para a persecução de alguns objetivos a que me propus.

Aos meus colegas, pela colaboração e estima.

Por último, mas não menos importantes, gostaria de manifestar os meus sinceros agradecimentos, em particular:

À minha família, em especial aos meus pais, pelos diversos sacrifícios, pois sem a sua ajuda seria quase impossível ter conseguido chegar onde cheguei.

Ao Nuno Caiado, pela paciência e amor que continuamente me vem transmitindo e por todo o apoio em todas as horas desde sempre e em especial na realização deste trabalho.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que fosse possível a realização do trabalho de projeto aqui apresentado.

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE REFORÇOS DE PAVIMENTOS À REFLEXÃO DE FENDAS

RESUMO

Os pavimentos rodoviários estão normalmente sujeitos à ação das cargas do tráfego e das variações climáticas. Estas provocam no pavimento diversos tipos de degradações, destacando-se o fendilhamento. O fendilhamento constitui a maior causa de degradação estrutural e funcional dos pavimentos a qual se reflete na segurança de circulação dos veículos. Além disso, permite a entrada de água pelas camadas do pavimento originando redução das capacidades de suporte e promovendo a origem de outras degradações.

A aplicação de camadas de reforço de pavimento, em mistura betuminosa, constitui uma das principais estratégias de reabilitação orientada para a reposição da capacidade estrutural dos pavimentos rodoviários. Na maioria dos casos, constata-se que a aplicação de reforços de pavimento sobre camadas de pavimentos fendilhados propicia a ocorrência do fenómeno de reflexão de fendas. Este fenómeno consiste na propagação das fendas existentes no pavimento fendilhado através da camada de reforço até à sua superfície.

Como tal, é fundamental para o estudo deste tipo de camadas a consideração deste fenómeno, de modo a que a vida à reflexão de fendas da camada de reforço seja determinada da forma adequada. No entanto, verifica-se através da bibliografia estudada que a maioria das metodologias de dimensionamento existentes não considera o fenómeno de reflexão de fendas como critério de ruína ou, quando o consideram, não incluem a situação de multifendilhamento.

Pretende-se, através deste trabalho, estudar o comportamento de diversas soluções de reforço quando sujeito ao fenómeno de reflexão de fendas num quadro de diferentes tipos de geometria de fendilhamento. Este estudo foi desenvolvido com base na simulação numérica do comportamento de reforços de pavimentos, usando um modelo baseados na metodologia dos elementos finitos, considerando como ação principal o tráfego. Deste estudo conclui-se sobre o comportamento de reforços na perspetiva do tipo de misturas incorporadas, do uso de intercamadas e quanto ao fendilhamento mais desfavorável no contexto da reflexão de fendas.

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS PERANTE FENDILHAMENTO

Palavras-chave

Pavimentos rodoviários

Reforço de pavimentos

Misturas betuminosas

Reflexão de fendas

Metodologia d elementos finitos

Extensões de Von Mises

Previsão da vida do reforço

NUMERICAL EVALUATION OF THE BEHAVIOR OF OVERLAYS PAVEMENT TO REFLECTIVE CRACKING

ABSTRACT

Road pavements are generally subjected to the action of traffic loads and climatic variations, that causes several types of degradations in the layers, mainly fatigue the cracks. Cracking is the major cause of structural and functional degradation of the pavement, which is reflected in the movement of vehicles. Furthermore, cracking occurrence allows entry of water through the pavement layers causing reduction of bearing capacity and promoting source of other degradations.

The application of asphalt hot mix overlays it is a major rehabilitation strategies aimed to restoring the structural capacity of the road pavements. In most cases, it is observed that the application of overlays on cracked pavement layers facilitates the occurrence of the phenomenon of reflective cracking. This phenomenon consists in the propagation of existing cracks in the cracked pavement through the overlay to its surface.

As such, it is fundamental to the study of this type of layers, the consideration of this phenomenon, so that the reflective cracking life of the overlay can be determined appropriately. However, it appears that the majority of existing overlay design methods do not consider the phenomenon of reflection cracks as a failure criterion or, when considered, does not include the situation of multi-cracking.

It is intend, through this work, to study the behavior of several solutions of overlays, when subjected to the phenomenon of reflective cracking, in a framework of different types of cracking geometry. This study is based on numerical simulation of the behavior of overlays by using a model based on finite element method, considering the traffic as the main action. From this study it is concluded about the behavior of overlays in terms of the incorporated mixtures type, the use of interlayer's and about the most unfavorable in the context of reflective cracking.

NUMERICAL EVALUATION OF THE BEHAVIOR OF OVERLAYS PAVEMENT TO REFLECTIVE CRACKING

Key-words

Flexible pavements

Pavement overlay

Bituminous mixtures

Reflective cracking

Finite elements methodology

Von Mises strains

Predicted overlay life

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Considerações iniciais.....	1
1.2	Objetivos e metodologia do trabalho	3
1.3	Organização do trabalho	3
2	Degradação e reabilitação de pavimentos.....	5
2.1	Constituição e degradação de pavimentos	5
2.1.1	Constituição e degradação de pavimentos.....	6
2.1.2	Degradação dos pavimentos	9
2.2	Fendilhamento	16
2.2.1	Consequências do fendilhamento	21
2.3	Reabilitação de pavimentos	22
2.3.1	Técnicas de reabilitação estrutural	23
2.3.2	Reabilitação por reforço de pavimento	25
2.4	Conceção de reforços de pavimentos.....	31
2.4.1	Método de dimensionamento considerando reflexão de fendas.....	32
2.5	Conclusões	35
3	Modelação à reflexão de fendas de reforços de pavimento	37
3.1	Descrição das situações de análise.....	37
3.2	Modelo Numérico	42
3.2.1	Princípios de modelação e comportamento da estrutura do pavimento ...	42
3.2.2	Descrição do Modelo.....	43
3.3	Procedimentos de Simulação de cada situação de análise	48
3.4	Conclusões	53
4	Análise do comportamento de reforços de pavimentos	55
4.1	Análise baseada em extensões de Von Mises	55
4.2	Análise de resultados quanto a soluções de reforço.....	58

4.2.1	Análise quanto ao material constituinte do reforço	58
4.2.2	Análise do reforço quanto à consideração de intercamadas	66
4.3	Análise do reforço quanto ao nível de fendilhamento	72
5	Considerações finais	81
	Referências bibliográficas	85

Índice de figuras

Figura 2.1 – Representação esquemática de um pavimento rodoviário	7
Figura 2.2 - Constituição de um pavimento rodoviário: (a) Flexível; (b) Rígido	8
Figura 2.3 – Fenómeno de bombagem num pavimento rígido, (Pereira & Miranda, 1999).....	15
Figura 2.4 – Progressão de uma fenda para uma camada superior segundo (Marchand & Goacolou, 1982)	24
Figura 2.5 – Estratégias normalmente adotadas na reabilitação estrutural de pavimentos fendilhados, (Minhoto, 2005)	25
Figura 2.6 - Mecanismo de propagação de fendas e respetivo sistema anti reflexão de fendas, (Antunes, et. al, 2005)	30
Figura 2.7 - Grelhas aplicadas na reabilitação de pavimentos rodoviários, (Jacinto M. A., 2011).....	30
Figura 2.8 – Gráfico de fluxos representativo do método proposto por (Sousa, et al., 2002).....	34
Figura 3.1 – Representação das malhas de fendilhamento em estudo;	42
Figura 3.2 – Representação esquemática da área a analisar – secção retangular mais pequena, (Pais, et al, 2012).....	44
Figura 3.3 – (a) Representação esquemática da área de influência de um rodado; (b) Representação de 25% da área influenciada pelo rodado de acordo com o eixo de simetria;	45
Figura 3.4 – Aspeto do resultado da discretização do modelo mecânico do pavimento... ..	46
Figura 3.5 – Elementos usados na discretização do modelo, (Help System, SOLID185, ANSYS, Inc.) e (Help System, SOLID186, ANSYS, Inc.).....	47
Figura 3.6 – Diagrama de fluxo representativo do processamento do modelo adotado;	49

Figura 3.7 - Propriedades mecânicas dos materiais e das espessuras das camadas superiores.....	50
Figura 3.8 – Procedimento realizado para obtenção dos resultados.....	50
Figura 3.9 – Representação das camadas a analisar acima da fenda – pavimento flexível	53
Figura 3.10 - Representação das camadas a analisar acima da fenda – pavimento flexível.....	53
Figura 4.1 - Extensão de Von Mises para diversas situações de reforço, aplicado num pavimento fendilhado com uma fenda, com e sem SAMI	56
Figura 4.2 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 2 cm, aplicado num pavimento fendilhado com uma fenda	59
Figura 4.3 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 6 cm, aplicado num pavimento fendilhado com uma fenda	60
Figura 4.4 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 12 cm, aplicado num pavimento fendilhado com uma fenda	61
Figura 4.5 – Comparação de valores de Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 2, 6 e 12 cm, aplicado num pavimento fendilhado com uma fenda.....	62
Figura 4.6 - Extensão de Von Mises dum reforço aplicado num pavimento fendilhado, sem SAMI, para diversas malhas de fendas	63
Figura 4.7 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 2 cm, aplicado num pavimento fendilhado com diversas malhas de fendas	64
Figura 4.8 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 6 cm, aplicado num pavimento fendilhado com malha #10	65
Figura 4.9 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 12 cm, aplicado num pavimento fendilhado com malha #10	66
Figura 4.10 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 2 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado, com uma fenda	67

Figura 4.11 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 6 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado, com uma fenda	68
Figura 4.12 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 12 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado, com uma fenda	68
Figura 4.13 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço, aplicado num pavimento rígido fendilhado, com uma fenda;	69
Figura 4.14 - Extensão de Von Mises dum reforço de 2 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado com malhas de fendas #80 e #90.....	70
Figura 4.15 - Extensão de Von Mises dum reforço de 6 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado.....	71
Figura 4.16 - Extensão de Von Mises dum reforço de 12 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado.....	71
Figura 4.17 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 2 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado.....	72
Figura 4.18 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 6 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado.....	73
Figura 4.19 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 12 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado.....	73
Figura 4.20 – Comparação de extensões de Von Mises dum reforço, aplicado num pavimento flexível fendilhado de 7, 5 cm e 2000 MPa de módulo, em diferentes níveis de fendilhamento	75
Figura 4.21 - Comparação de extensões de Von Mises dum reforço, aplicado num pavimento flexível fendilhado de 7, 5 cm e 4000 MPa de módulo, em diferentes níveis de fendilhamento	76
Figura 4.22 -- Comparação de extensões de Von Mises dum reforço, aplicado num pavimento flexível fendilhado de 15 cm e 2000 MPa de módulo, em diferentes níveis de fendilhamento	77

Figura 4.23 - Comparação de extensões de Von Mises dum reforço, aplicado num pavimento flexível fendilhado de 15 cm e 4000 MPa de módulo, em diferentes níveis de fendilhamento 78

Figura 4.24 - Comparação de extensões de Von Mises dum reforço, aplicado num pavimento rígido fendilhado de 20 cm e 20000 MPa de módulo, em diferentes níveis de fendilhamento..... 79

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Tipos de pavimentos em função da deformabilidade;	6
Tabela 2.2 – Composição das camadas de pavimento flexível e rígido	9
Tabela 2.3 – Famílias e tipos de degradações dos pavimentos rodoviários flexíveis (Pereira & Miranda, 1999)	10
Tabela 2.4 - Famílias e tipos de degradações dos pavimentos rodoviários rígidos;.....	11
Tabela 2.5 - Agentes de Degradação de um pavimento rodoviário, (Vicente, 2006).....	11
Tabela 2.6 – Relações de causa-efeito das degradações dos pavimentos flexíveis, (Pereira & Miranda, 1999)	13
Tabela 2.7 - Nível de Severidade em função do seu desenvolvimento	17
Tabela 2.8 - Níveis de gravidade em função da malha e respetiva abertura das fendas	18
Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais, adaptado (Shatnawi, et al., 2011)	38
Tabela 3.2 – Situações de simulação em pavimento flexíveis fendilhados (1)	38
Tabela 3.3 – Situações de simulação em pavimento flexíveis fendilhados (2)	39
Tabela 3.4 – Situações de simulação em pavimento flexíveis fendilhados (3)	39
Tabela 3.5 – Situações de simulação em pavimento flexíveis fendilhados (4)	40
Tabela 3.6 – Situações da composição de pavimentos rígidos;.....	41
Tabela 3.7 – Características mecânicas das camadas granulares dos pavimentos em estudo.....	50
Tabela 3.8 – Coeficientes da lei da Shell adotados para as misturas estudadas;	52

Lista de abreviações

AASHTO	American association of state highway and transportation officials
BMB	Betume modificado com borracha
CBR	California bearing ratio
cm	Centímetro
°C	Graus centígrados
E	Módulo de Deformabilidade
E_r	Módulo de deformabilidade da camada de reforço
E_f	Módulo de deformabilidade da camada fendilhada
e_r	Espessura da camada de reforço
e_f	Espessura da camada fendilhada
FWD	Falling weight deflectometer
G	Módulo de Distorção
HMA	Hot mix asphalt
JAÉ	Junta autónoma de estradas
kN	Kilonewton
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MACOPAV	Manual de conceção de pavimentos
MBAM	Misturas betuminosas de alto módulo
MC	Mistura Convencional
MEF	Método dos elementos finitos
MPa	Megapascal

m	Metro
mm	Milímetro
N_f	Resistência à fadiga
Pav	Pavimento
PE	Polietileno
PMB	Betume modificado com polímeros
PP	Polipropileno
SAMI	Stress absorbing menbrane Interlayer
SAM	Stress absorbing membrane
V_b	Volume de betume da mistura betuminosa
ϵ_{VM}	Extensão de Von Mises
ϵ_f	Extensão de tração
ν	Coeficiente de Poisson

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

Numa rede rodoviária o pavimento constitui a infraestrutura mais importante no contexto da previsão dos investimentos em conservação/reabilitação, sendo aquela que está mais sujeita às ações mais severas, quer do tráfego quer do clima (Sabaté, 2008). Por este facto é que os maiores investimentos de conservação e reabilitação da rede rodoviária são dirigidos para a reabilitação dos pavimentos da rede. Este facto constitui uma motivação para o incremento do investimento, por parte dos países desenvolvidos, em investigação científica nesta área.

Portugal detém atualmente uma rede rodoviária bem consolidada, constituída principalmente por pavimentos flexíveis que integram a totalidade dos itinerários, aos mais diversos níveis de rede. Estes tipos de pavimentos rodoviários são dimensionados de forma a responder às solicitações do tráfego e do clima para um período de vida de 20 anos em condições de conforto e segurança. Ao fim deste período da vida útil as administrações rodoviárias deparam-se com a necessidade de ter de promover intervenções de reabilitação estrutural e funcional, independentemente das estratégias de conservação corrente adotadas.

A necessidade de reabilitação resulta do decréscimo de conforto e qualidade da rede rodoviária devido à ocorrência de degradações resultantes dos processos de degradação a que está sujeito ao longo do seu período de vida, essencialmente pela ação do tráfego, conjugada com as ações climáticas. Do ponto de vista estrutural, as principais degradações que contribuem para a perda de qualidade do pavimento estão associadas ao fendilhamento por fadiga, agravado pelas deformações permanentes.

A escolha das soluções a adotar nas diversas estratégias de conservação depende sempre do estado estrutural e funcional do pavimento a reabilitar e tendo em vista os níveis de qualidade que se pretende atingir com a estratégia adotada (Minhoto, 2005). Constatase que a estratégia de reabilitação mais adotada na maioria dos países se baseia na aplicação de reforços estruturais sobre os pavimentos existentes, na sua maioria pavimentos degradados por fendilhamento. Considera-se que o reforço estrutural de pavimentos constitui a melhor estratégia de reabilitação, sendo aquela que conduz à

melhor recuperação dos estados funcional e estrutural do pavimento, de acordo com os objetivos para o qual foi projetado. No entanto, constata-se existir um problema associado a este tipo de solução e que consiste na ocorrência da propagação das fendas das camadas fendilhadas do pavimento existente para as camadas novas de reforço. Esta é a causa pela qual os reforços de pavimento apresentam normalmente um fendilhamento precoce.

A propagação das fendas no reforço dá-se da sua base para a superfície e este processo designa-se por “reflexão de fendas”, resultado da combinação da ação do tráfego com o efeito das variações de temperatura.

A colocação de um reforço sobre as camadas betuminosas fendilhadas, leva a um desempenho estrutural do pavimento diferente dos pavimentos novos pelo facto de, além dos mecanismos de ruína a que estão sujeitos os pavimentos novos, o reforço estar também sujeito à reflexão de fendas, que normalmente não é tido em conta no seu processo de dimensionamento. Neste contexto, as soluções de reforço produzidas podem não ser adequadas devido a não preverem particularidades de comportamento dos reforços sobre pavimentos fendilhados, principalmente no que toca à reflexão de fendas.

Neste domínio, tem sido desenvolvida investigação com o objetivo da introdução de uma metodologia de dimensionamento de reforços que contabiliza a reflexão de fendas. Nesse âmbito têm sido desenvolvidos diversos trabalhos de diversos autores, como (Sousa, et. al, 2002), (Pais, 1999) e (Minhoto, 2005), com o intuito de contemplar a reflexão de fendas como um critério de ruína no dimensionamento de reforços considerando a ação do tráfego e das variações de temperatura.

A maioria destes estudos analisa o comportamento dos reforços de pavimento tendo como base a consideração de camadas existentes fendilhadas apenas com uma fenda. No sentido de alargar o estudo, parece importante que o comportamento dos reforços de pavimento perante a ocorrência de mais do que uma fenda deve constituir mais um aspeto a ter em conta na caracterização do comportamento à reflexão de fendas.

Além disso considera-se de grande importância a otimização de soluções de reforço com diferentes e melhores materiais, sejam eles convencionais ou novos, com diferentes

características mecânicas e geométricas, mas para tal torna-se necessária a consideração duma verificação à reflexão de fendas.

Esta constitui a principal motivação impulsionadora deste trabalho no sentido de contribuir para a compreensão do comportamento de reforços de pavimento à reflexão de fendas num contexto multifendilhamento, orientado para otimização na escolha dos materiais adoptados, suas espessuras e suas características subjacentes, baseado exclusivamente no uso de modelos numéricos.

1.2 Objetivos e metodologia do trabalho

O trabalho desenvolvido no presente documento é intitulado “*Avaliação Numérica do Comportamento de Reforços de Pavimento à Reflexão de Fendas*” e consiste no estudo do fenómeno da reflexão de fendas em camadas de reforços de pavimentos rodoviários flexíveis e rígidos, tendo como ação fundamental a do tráfego, baseado na simulação numérica. Com este estudo pretende averiguar-se da pertinência da modelação do comportamento de reforços de pavimento através de modelos numéricos desenvolvidos com base na metodologia dos elementos finitos, bem como da sua capacidade de contemplar um maior número possível de aspectos fundamentais no comportamento daquelas estruturas de pavimento, concretamente o multifendilhamento, simulando um carregamento baseado na aplicação da carga representativa dum rodado dum eixo padrão de 80kN. Pretende-se ainda contribuir para uma melhor compreensão do fenómeno de reflexão de fendas, para além da verificação do comportamento de diversas soluções de reforço, perante diversos tipos de geometrias de fendilhamento.

1.3 Organização do trabalho

A realização deste trabalho seguiu a programação definida no plano de trabalhos no contexto do tema proposto, resultando em cinco capítulos, que serão descritos sucintamente nos parágrafos seguintes.

Neste capítulo, **capítulo 1**, faz-se um enquadramento do tema desenvolvido, de modo a justificar-se a necessidade de uma investigação nesta área específica, reflexão de fendas nos reforços de pavimentos. Enumera-se também uma breve descrição dos conteúdos de cada uma das partes que integram esta dissertação.

No **capítulo 2** é feita uma descrição das degradações associadas aos pavimentos flexíveis e rígidos. Neste capítulo, segue-se ainda uma apresentação de alguns conceitos inerentes à reabilitação estrutural dos pavimentos existentes, bem como dos diversos tipos de fendilhamento.

A modelação do comportamento de pavimentos é efetuada no **capítulo 3**. É ainda elaborada uma descrição do modelo utilizado para melhor compreensão do trabalho elaborado, salientando os princípios da modelação e a descrição das situações de análise.

No **capítulo 4** é realizada a análise e interpretação dos resultados do comportamento das estruturas de pavimento, recorrendo ao tratamento de dados efetuado com base nos valores de extensão Von Mises obtidos pelo *software ANSYS® Academic Teaching Introductory, Release 14.0*.

O **capítulo 5** apresenta uma síntese das principais conclusões obtidas ao longo do trabalho. É também feita referência às questões consideradas pertinentes para o desenvolvimento de trabalhos futuros no âmbito deste tema.

2 Degradação e reabilitação de pavimentos

Um pavimento é constituído por um conjunto de camadas horizontais sobrepostas de espessura finita suportadas pela fundação, a qual é constituída pelo terreno natural, em que a função primordial é proporcionar aos utilizadores uma superfície confortável e segura para a circulação dos veículos ao longo da sua vida útil.

Os pavimentos rodoviários constituem a estrutura mais importante numa rede rodoviária e devem apresentar uma capacidade de resistência à aplicação de cargas mecânicas por parte do tráfego, sob as mais diversas condições climáticas, garantindo aos utilizadores conforto e segurança.

Uma vez em serviço, um pavimento rodoviário deverá, tanto tempo quanto possível, manter as suas funções estruturais e funcionais dentro de limites de qualidade mínimos, contudo do ponto de vista dos utilizadores, o mais importante são as condições ao nível de serviço, ou seja, o desempenho que tem o pavimento aquando da sua utilização. No entanto, apesar de todo o cuidado colocado na conceção/produção destas estruturas, constata-se que quando se aproxima o fim da vida útil do pavimento este exibe um conjunto de degradações, como por exemplo o fendilhamento. É nesta fase que se torna necessário tomar medidas de conservação/reabilitação adotando estratégias de reabilitação, como por exemplo a adoção de reforços de pavimentos.

O presente capítulo tem como objetivo enquadrar o trabalho realizado, apresentando os principais tipos de pavimentos existentes, sua caracterização, bem como as possíveis degradações e respetivas causas. Será referenciada também a importância da utilização de um reforço nos pavimentos tais como as diversas técnicas de reabilitação estrutural, fatores de dimensionamento, e por último será apresentado um método de dimensionamento de um reforço.

2.1 Constituição e degradação de pavimentos

Neste subcapítulo apresenta-se uma análise geral dos pavimentos, objeto de análise do trabalho que se apresenta, numa perspetiva da sua constituição e da sua degradação em serviço, particularizando para o caso do fendilhamento.

2.1.1 Constituição e degradação de pavimentos

Espera-se dos pavimentos rodoviários a assunção de funções estruturais e funcionais. Numa perspetiva estrutural o pavimento deve exibir uma capacidade de suportar as cargas provocadas pelo tráfego, enquanto a sua resposta funcional está relacionada com o conforto e a segurança dos utilizadores aquando da sua circulação.

De acordo com Silva (2005), os pavimentos desempenham as seguintes funções:

- Funções estruturais – reduzir as tensões verticais aplicadas ao nível da fundação, de modo a que resista às solicitações do tráfego, impedindo ainda o acesso de água externa às camadas granulares e ao solo de fundação;
- Funções funcionais – criar uma superfície regular e resistente, com suficiente rugosidade e resistência ao desgaste, de modo a garantir segurança e comodidade de circulação.

As diversas camadas de um pavimento podem ser constituídas por diferentes materiais o que conduz à existência de 3 tipos de pavimentos distintos, por possuírem comportamentos distintos aquando das solicitações de tráfego e condições climáticas. De acordo com o critério de classificação dos pavimentos, a deformabilidade (Tabela 2.1), podem distinguir-se 3 tipos de pavimentos:

- Pavimentos flexíveis;
- Pavimentos semirrígidos
- Pavimentos rígidos.

Tabela 2.1 – Tipos de pavimentos em função da deformabilidade;

Tipo de pavimento	Deformabilidade
Flexível	Elevada
Semirrígido	Baixa
Rígido	Muito Baixa

Quanto à constituição, um pavimento rodoviário tipo é correntemente constituído por 5 camadas, sendo este considerado como um sistema multicamada, como se pode visualizar na Figura 2.1. Estas camadas são designadas como:

1. Camada de desgaste;
2. Camada de ligação;
3. Cada de base;
4. Cama de sub-base;
5. Leito de Pavimento
6. Fundação.

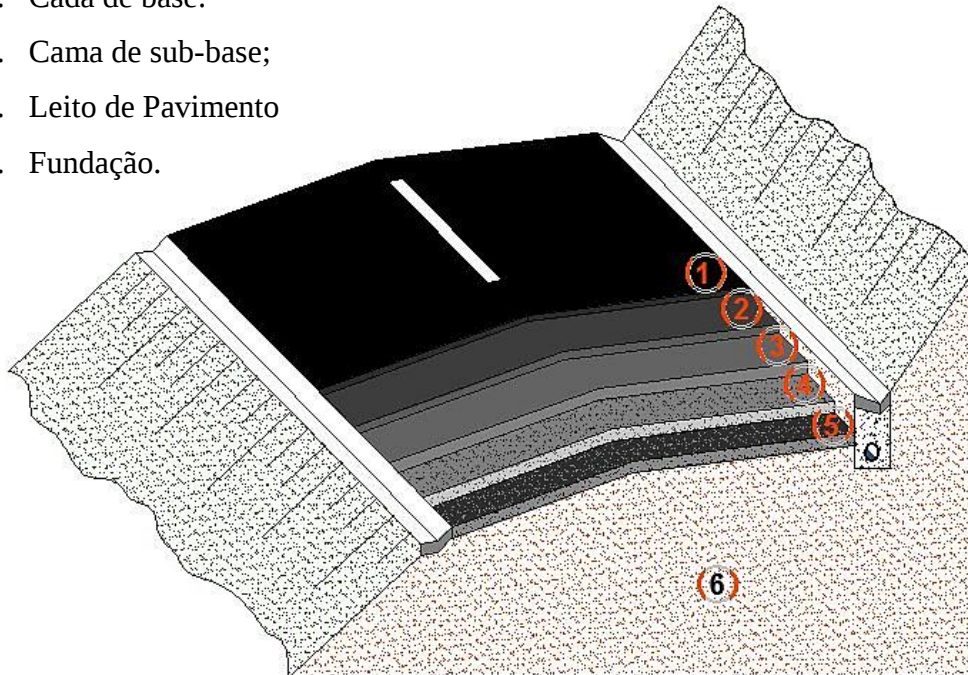


Figura 2.1 – Representação esquemática de um pavimento rodoviário

A fundação é a resultante dos trabalhos de terraplanagem, necessários para o estabelecimento duma superfície plana, com resistência suficiente para suportar as camadas subsequentes. Esta camada, normalmente designada por “leito de pavimento” deve garantir uma superfície regular com capacidade de suporte tanto na fase de construção, garantindo as condições de traficabilidade adequadas ao tráfego de obra, como na fase de funcionamento conjunto com a restante estrutura de pavimento, conferindo boas condições de fundação ao pavimento em termos de capacidade suporte (Portugal, 2009).

As camadas que constituem o pavimento apresentam características diferenciadas consoante o tipo de pavimento que integram. No caso de pavimentos flexíveis, integram camadas de materiais não ligados (granulares) e as de materiais ligados com ligantes betuminosos. No caso dos pavimentos rígidos, integram camadas granulares, podendo ou não ser tratadas/estabilizadas com cimento, e por uma laje de betão de cimento.

Estas camadas são caracterizadas por possuírem funções estruturais, em que o principal objetivo é a garantia de capacidade de suporte das cargas do tráfego. Normalmente possuem qualidade e resistência decrescentes da superfície para a fundação, de forma

adequada ao decréscimo do valor dos esforços em profundidade. Cada uma destas camadas individualmente tem a função de assegurar o apoio à construção da camada ulterior.

A camada de sub-base tem como função a degradação das tensões de compressão até ao solo de fundação e garantindo a aptidão para suportar a circulação da obra. A camada de base tem a função estrutural de reduzir as pressões verticais e com isto ajudar a diminuir as tensões de compressão na camada subsequente.

A camada de ligação tem por função criar uma superfície mais regular onde assenta a camada de desgaste e contribui para a resistência global da estrutura do pavimento. A camada de desgaste tem como função garantir as características funcionais do pavimento, de modo a assegurar a circulação em condições de segurança, conforto e economia. Contribui ainda para as características estruturais para além de impermeabilizar o pavimento, evitando a infiltração de água para o solo de fundação.

Os pavimentos rígidos têm a constituição e modo de funcionamento bem diferentes dos pavimentos flexíveis (Branco et. al, 2008). Nos pavimentos rígidos a camada de desgaste e a camada de base é representada numa só, pela laje de betão de cimento, conforme se apresenta na Figura 2.1 e na Tabela 2.2. Esta é composta por materiais estabilizados com ligantes hidráulicos, usualmente o cimento como indica o próprio nome e desempenha o papel de principal elemento estrutural devido à sua elevada rigidez em flexão, ajudando as camadas seguintes a não sofrerem acentuadas deformações.

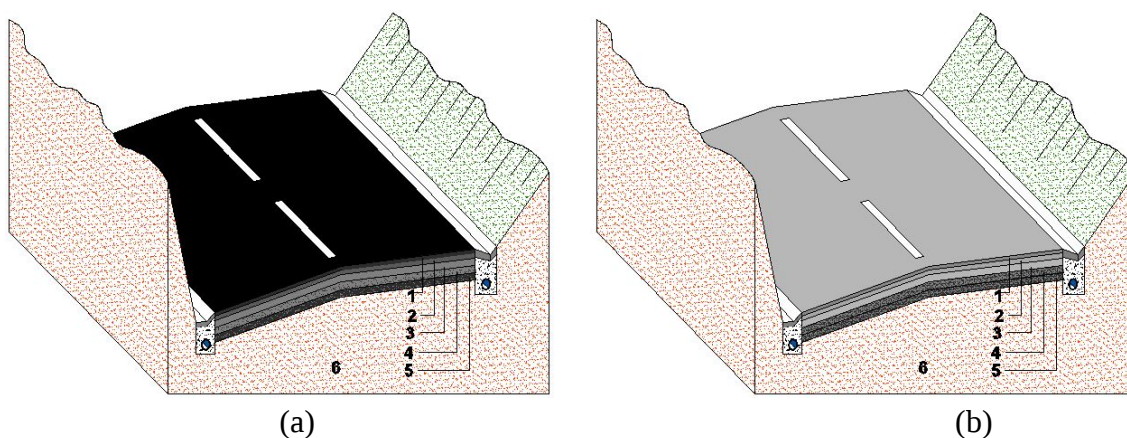


Figura 2.2 - Constituição de um pavimento rodoviário: (a) Flexível; (b) Rígido

As camadas subsequentes são seguidas de uma ou duas camadas, constituídas por materiais tratados com cimento. Têm como função suportar e redistribuir as tensões para a fundação. A fundação é uma camada de superfície regular com condições de resistência à erosão e que assegura uma uniformização de assentamentos.

Tabela 2.2 – Composição das camadas de pavimento flexível e rígido

Número (camada pav.)	Pavimento Rodoviário Flexível	Pavimento Rodoviário Rígido
1	Camada de Desgaste (Mistura Betuminosa)	Camada de Desgaste (Laje de Betão)
2	Camada de Regularização (Mistura Betuminosa)	
3	Camada de base (Materiais Granulares ou Misturas Betuminosas)	Camada de base (Materiais Tratados com Cimento)
4	Camada de Sub-base (Materiais Granulares)	A existir é igual à camada de base
5	Leito de Pavimento	Leito de Pavimento
6	Fundação	Fundação

2.1.2 Degradação dos pavimentos

A degradação dos pavimentos rodoviários (e dos flexíveis em particular) é um processo complexo que resulta da evolução natural dos mesmos. As degradações têm uma determinada localização no pavimento e há uma determinada sequência e interação mútua entre elas. A partir de determinada altura, este facto faz com que todo o processo de degradação seja acelerado, sobretudo no final do período de vida do pavimento (Silva, 2005). As degradações dos pavimentos rodoviários flexíveis são classificadas em 4 famílias, como se pode observar na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Famílias e tipos de degradações dos pavimentos rodoviários flexíveis
(Pereira & Miranda, 1999)

Famílias de Degradações	Tipos de Degradações
Deformações	Abatimento: Longitudinal: Berma Eixo Transversal Deformações Localizadas
	Ondulação
	Rodeiras: Grande raio (devido, principalmente, ao solo de fundação) Pequeno raio (devido às misturas betuminosas)
Fendilhamento	Fendas: Fadiga Longitudinais: Eixo Berma Transversais Parabólicas
	Pele de Crocodilo: Malha Fina (≤ 40 cm) Malha Larga (> 40 cm)
Desagregação da Camada de Desgaste	Desagregação Superficial
	Cabeça de Gato
	Pelada
	Ninhos (covas)
Movimento de Materiais	Exsudação
	Subida de finos

As principais degradações dos pavimentos rodoviários rígidos constituídos por laje são classificadas em 3 famílias, como é possível observar no Tabela 2.4.

A evolução das degradações de um pavimento, apoia-se no “princípio da cadeia de consequências” onde uma degradação não evolui isoladamente no tempo (Branco, et. al, 2008). As operações de terraplanagens, pavimentação e drenagem têm um papel importante na causa de degradações de um pavimento quando má executadas, bem como a utilização de materiais inadequados. De uma forma sucinta, pode considerar-se como agentes de degradação dum pavimento os que se apresentam na Tabela 2.5.

Tabela 2.4 - Famílias e tipos de degradações dos pavimentos rodoviários rígidos

Famílias de Degradação	Tipos de Degradação
Fendilhamento das lajes	Fadiga
	Retração
	Encurvamento das Lajes
Desagregação superficial	Desagregação nas Juntas
	Desagregação na Laje
Escalonamento das lajes (Bombagem)	Escalonamento das Lajes

As degradações encontradas nos pavimentos rodoviários correntemente resultam da perda de qualidade inicial dos materiais constituintes das camadas de pavimento. No entanto estas podem agravar-se devido aos fatores mencionados na Tabela 2.5.

As degradações podem afetar tanto o comportamento funcional como estrutural caracterizando-se assim como degradações das características superficiais e degradações das características estruturais respetivamente.

Tabela 2.5- Agentes de Degradação de um pavimento rodoviário (Vicente, 2006)

Agentes de Degradação	
Ações sobre o pavimento	Tráfego
	Temperatura
	Água
Má execução durante a construção (terraplanagens, pavimentação, sistemas de drenagem)	
Formulação deficiente e materiais inadequados	

A evolução das degradações de carácter funcional leva também à perda das características estruturais resultando na possível ruína do pavimento. O desempenho funcional tem de verificar algumas exigências, tais como a aderência, a redução do ruído à passagem dos veículos e resistência à passagem da água através da sua capacidade de drenagem superficial.

As degradações de índole estrutural manifestam-se pelo aparecimento de fendas à superfície do pavimento, podendo também surgir outro tipo de degradações tais como, deformações, desagregações superficiais e movimento de materiais. O desempenho estrutural tem de verificar alguns requisitos, como resistência à fadiga, à reflexão de fendas, ao envelhecimento e ao fendilhamento em geral.

A evolução do comportamento dum pavimento é bastante complexa pois cada ação provoca uma alteração específica sobre as propriedades dos materiais constituintes dos pavimentos (Minhoto, 2005).

As degradações dos pavimentos rodoviários flexíveis, segundo (Pereira & Miranda, 1999), podem ainda ser definidas segundo uma relação causa-efeito, como apresentado na Tabela 2.6, em que «***» correspondem a uma forte relação, «**» a uma média relação e finalmente «*» corresponde a uma fraca relação entre a degradação e a causa que a provocou.

De seguida, são descritos os vários tipos de degradações existentes nos pavimentos rodoviários flexíveis e rígidos tendo por base a Tabela 2.3 e a Tabela 2.4, onde o fendilhamento terá maior incidência, pois está na base do desenvolvimento deste trabalho.

As rodeiras consistem em deformações longitudinais que se observam na zona de passagem dos rodados dos veículos pesados, sendo mais evidente na parte externa das faixas de rodagem. Na família das deformações, estas são as mais usuais e ocorrem particularmente devido ao comportamento anormal das camadas que constituem os pavimentos, sejam betuminosas, granulares e solo de fundação.

O abatimento é uma deformação que se encontra tanto longitudinalmente como transversalmente à faixa de rodagem e deve-se à deficiente capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação, respetivos materiais utilizados e sobretudo à entrada de água nestas camadas de pavimento.

As deformações localizadas desenvolvem-se em pequenas áreas de pavimento, resultando da rotura do pavimento. As ondulações ocorrem ao longo do pavimento e manifestam-se transversalmente à faixa de rodagem. Este tipo de deformação pode surgir devido à falta de capacidade para suportar as trações induzidas pelo tráfego, por lacuna construtiva ou ainda como resultado da deformação do solo de fundação.

Tabela 2.6 – Relações de causa-efeito das degradações dos pavimentos flexíveis
(Pereira & Miranda, 1999)

Degradações	Fatores de Degradação									
	Condições de Drenagem	Sub-dimensões da Camada de Desgaste	Sub-dimensões das Camadas Inferiores	Capacidade de Suporte da Fundação	Qualidade dos Materiais	Deficiências de Fabrico e Execução	Ligação entre Camada de Base e de Desgaste	Agressividade do Tráfego	Ações Climáticas	Camadas Estruturais de Reduzida Compacidade
Deformações	***	*	**	***	*	**		*	*	***
Rodeiras	***	*	**	***	**	*		**	**	***
Fendas	**	**	**	**	***	**	**	***	***	***
Fendas Parabólicas	*	**			**	**	***	***	***	**
Pele de Crocodilo	**	**	**	**	***	**	**	***	***	***
Pelada		***	*		**	**	***	***	**	**
Ninhos		**	*		***	***	**	**	**	***
Cabeça de Gato					***	**		***	*	**
Desagregação Superficial					***	***		**	***	**
Exsudação					***	**		***	***	

A desagregação da camada de desgaste traduz-se num desprendimento dos agregados grossos como perda de qualidade dos materiais que compõem a camada de desgaste. Pode dever-se à deficiente ligação entre os diferentes materiais que constituem a mistura e seu fabrico.

A cabeça de gato resulta da perda da componente mais fina da mistura betuminosa, ou seja do desgaste rápido do mástique que envolve os agregados mais grossos, deixando-os mais salientes, originando visivelmente uma profundidade na superfície. Esta

degradação pode ter origem em condições severas de tráfego devido às ações tangenciais elevadas provocadas pelos pneus aos pavimentos.

As peladas decorrem de um desprendimento de pequenas placas da camada de desgaste em relação à sua camada inferior – camada de regularização. Podem ter origem na deficiente ligação entre as duas camadas betuminosas, na sua espessura reduzida ou ainda em problemas de estabilidade da camada de desgaste.

Os ninhos ou covas são cavidades localizadas na camada de desgaste e são consideradas como a fase final no processo de degradação de um pavimento, surgindo com a evolução do estado mais gravoso de fendilhamento que é a pele de crocodilo.

A degradação conhecida como movimento de materiais apresenta-se numa de duas possíveis formas, ou a exsudação ou a subida de finos. A exsudação consiste na subida do ligante para a superfície devido à má formulação da camada de desgaste (excesso de ligante, viscosidade reduzida, excesso de fração fina dos agregados), que em consonância com a ação severa do tráfego e das altas temperaturas, leva à migração daquele para a superfície do pavimento (Branco et. al, 2008).

A subida dos finos que ocorre sobretudo quando o pavimento já se encontra fendilhado e quando paralelamente há um nível freático elevado devido às ações climáticas. Com a passagem do tráfego pesado, é exercitada uma força de compressão sobre o pavimento provocando a expulsão da água do interior das camadas, facultando a saída das partículas finas para o exterior – superfície.

O fendilhamento nos pavimentos contribui para o enfraquecimento das camadas granulares e do solo de fundação. As suas causas advêm da penetração de águas pelas fendas que aceleram a evolução da degradação e assim reduzem a capacidade de suporte.

Por serem constituídos por misturas betuminosas, os pavimentos tornam-se mais rígidos e predispostos à ocorrência de fendilhamento, devido ao envelhecimento do betume que ocorre pela sua exposição à temperatura, e pelo tempo de serviço decorrido.

A desagregação superficial nos pavimentos rígidos sucede-se ao longo das juntas ou em plena laje. A desagregação das juntas ocorre por serem demasiado estreitas ou terem deficiente selagem. Com isto permitem a entrada de agregados e por consequência da

ação dos pneus ao esmagamento do betão. A desagregação em plena laje ocorre devido à aplicação de materiais de deficiente qualidade e ao desgaste provocado pela ação do tráfego. Este fenómeno leva ao arranque de agregados ou mesmo ao desprendimento de placas – pelada. O fenómeno de bombagem de finos acontece quando os bordos da laje são solicitados pelas cargas provocadas pelo tráfego, dando origem ao fendilhamento do pavimento. Com isto os pavimentos rígidos apresentam o primeiro passo para acontecer este fenómeno pelo facto de assim ocorrer a infiltração de águas para o interior do pavimento. Devidos às pressões elevadas que se instalam nos pavimentos rígidos por parte da laje de betão, esta água tende a sair transportando consigo partículas sólidas e contribuindo para o fenómeno de erosão interna da fundação.

A degradação designada por escalonamento das lajes, assinalada pelo fenómeno de bombagem, Figura 2.3, ocorre quando sob ação repetida do tráfego verifica-se a combinação dos três pontos seguintes (Branco et. al, 2008):

- Camada de sub-base ou solo de fundação com materiais erodíveis;
- Acesso da água às camadas de sub-base e do solo de fundação;
- Insuficiente proteção das juntas.

Para interpretar melhor o fenómeno, estão ilustradas na Figura 2.3 as 3 fases em que se desenvolve a bombagem.

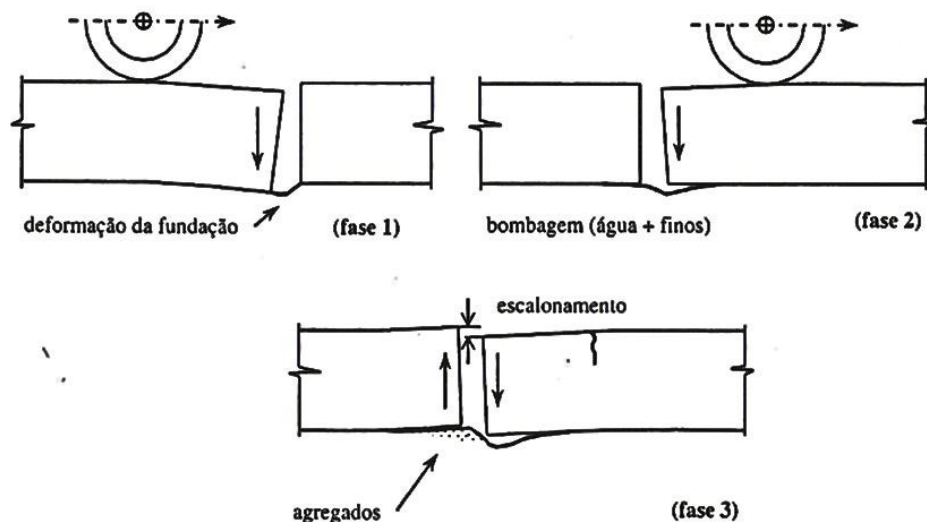


Figura 2.3 – Fenómeno de bombagem num pavimento rígido (Pereira & Miranda, 1999)

2.2 Fendilhamento

O fendilhamento constitui um tipo de degradação muito corrente nos pavimentos rodoviários flexíveis e rígidos, sendo considerada a principal degradação e é normalmente causado pelo excesso de tensões de tração nas camadas betuminosas. Segundo Minhoto (2005), dependendo do tipo de mecanismo no processo de evolução desta degradação, pode ter-se fendilhamento classificado em diversos tipos, como:

- Fendilhamento por fadiga devido às cargas do tráfego;
- Fendilhamento por a retração térmica devido às variações de temperatura;
- Fendilhamento por encurvamento das lajes;
- Fendilhamento com origem na superfície;
- Fendilhamento por reflexão de fendas que surge nos pavimentos já reforçados.

Todavia existem várias causas que originam este tipo de degradação, como a falta de capacidade de suporte das camadas granulares e de fundação, falha na própria construção, deficiente qualidade dos materiais empregues, e mesmo devido às condições antagónicas da atmosfera.

Para caracterizar as fendas é necessário ter em conta diversos aspetos, como a forma, a orientação e a abertura das fendas. Por sua vez, as fendas também podem apresentar variadas formas tendo em conta a estrutura do pavimento, a sua origem e propagação. A forma é caracterizada em retilínea, curva e mista. Quanto à orientação, as fendas podem ser transversais e longitudinais.

Em relação à abertura das fendas classificam-se como muito finas, finas e largas dependendo dos casos. A abertura é definida em função do espaçamento entre os dois bordos de uma fenda, ou seja, classificadas como fendas fechadas ou abertas. As fendas podem apresentar-se isoladas (orientadas no sentido horizontal), ramificadas, entrelaçadas ou, ainda em “pele de crocodilo”, quanto ao seu modo de desenvolvimento, nomeadamente:

- Muito finas – apresentam uma abertura de apenas algumas décimas de milímetro;
- Finas – Compreendida entre 1 e 2 mm;
- Largas – Aberturas superiores a 2 mm.

As fendas na sua generalidade são caracterizáveis de acordo com o nível de gravidade, como pode ver-se na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Nível de Severidade em função do seu desenvolvimento

Fendas	Nível de Gravidade
Isolada	1
Ramificada (abertura entre 2 e 4mm)	2
Ramificada (abertura maior 4mm)	3

Fendilhamento por fadiga

Os pavimentos são projetados para um determinado número de eixos padrão, e quando esse valor é ultrapassado, dá-se a rotura do pavimento. A rotura do pavimento pode ser na globalidade da estrutura ou limitado à camada de desgaste e manifesta-se pela ocorrência de fendilhamento. Este é então designado por fendilhamento por fadiga e resulta essencialmente da ação do tráfego nas camadas superficiais do pavimento. É o tipo de fendilhamento mais corrente. As fendas podem ser visíveis isoladas ou ramificadas, e geralmente orientadas longitudinalmente, progredindo depois transversalmente e noutras direções.

O fendilhamento associado ao carregamento cíclico do tráfego tem início na base das camadas superficiais, zona em que existem os maiores esforços de tração, e propagam-se no sentido da superfície do pavimento, à medida que vão sendo aplicados os ciclos de carga.

Quanto às fendas designadas como pele de crocodilo resultam da evolução de outros tipos de fendilhamento ao longo do tempo, possivelmente das fendas ramificadas, mais ou menos próximas, formando uma malha ou grelha. Este é o estado final de desenvolvimento do fendilhamento. A evolução deste tipo de fendilhamento pode levar a outras degradações como à formação de covas ou peladas e dá-se com a evolução de uma malha larga para uma estreita.

O fendilhamento pele de crocodilo é caracterizado por vários níveis de severidade e de acordo com a abertura da malha, como pode confirmar-se na Tabela 2.8, em que 1 significa baixo, 2 médio e 3 elevado.

Tabela 2.8 - Níveis de gravidade em função da malha e respetiva abertura das fendas

Abertura das Fendas	Malha	Nível de Severidade
Menor 2mm	Maior 20cm	1
Menor 2mm	Menor 20cm	2
2 a 4mm ou maior 4mm	Maior 40cm	2
Maior 4mm	Menor 40cm	3

Fendilhamento induzido termicamente

Fendilhamento induzido termicamente ocorre em climas frios, com amplitudes térmicas elevadas e com bruscas diferenças de temperatura (arrefecimento). Tem início na superfície do pavimento e progride no sentido da base das camadas.

O fendilhamento induzido termicamente classifica-se em dois tipos:

- Fendilhamento por fadiga térmica – ocorre devido à acumulação dos pequenos danos provocados pelos ciclos térmicos diários;
- Fendilhamento devido apenas a um ciclo de arrefecimento a baixa temperatura – ocorre sob condições de baixas temperaturas onde a tensão de tração admissível do material é igualada ou ultrapassada.

Fendilhamento por encurvamento das lajes

O encurvamento das lajes advém da ocorrência de gradientes de temperatura entre as faces superior e inferior da laje de betão, o que conduz a esforços adicionais (Branco et. al, 2008), apesar deste movimento encontrar-se limitado devido às disposições construtivas das juntas, através da colocação de barras de transferência de carga. De acordo com o período em consideração, diurno ou noturno, ocorre encurvamento para o exterior ou interior respetivamente. Quando o encurvamento dá-se para o exterior, ocorre uma ausência de contacto entre a laje e o suporte o que impõe um acréscimo de esforços de tração na face interior da laje aquando da passagem dos veículos. No período noturno, o encurvamento dá-se na direção oposta bem como os esforços resultantes (face superior da laje).

Fendilhamento com origem na superfície

O fendilhamento com início na superfície é devido à conjugação do efeito de retração térmica com a fragilidade dos materiais que compõem as misturas, e ainda entre outros fatores da qualidade de construção. Este é caracterizado de acordo com a localização, profundidade e direção.

As tensões induzidas ao pavimento devido às baixas temperaturas auxiliado com a fragilidade do material provocam tensões superiores à admissível pelo material e assim dá-se pequenas fendas (micro fendas), o que resulta em fendilhamento com início na superfície.

Fendilhamento por reflexão de fendas

O fendilhamento por reflexão de fendas é a designação que se dá quando fendas pré-existentes nas camadas antigas progridem desde a base do reforço até à sua superfície. Este tipo de fendilhamento leva à rotura prematura da camada de reforço e é o principal fator pela redução de vida prevista desta mesma camada.

O fenómeno da reflexão de fendas tem origem na abertura e fecho das fissuras existentes nas camadas do pavimento original, que é provocado pela forma de atuação das variações de temperatura, ações do tráfego e tensões associadas, da geometria das camadas e materiais constituintes, bem como pelas características das próprias fendas, da fundação e da ligação entre camadas, o que desempenha um papel importante na iniciação da propagação das fissuras existentes até à superfície do reforço formando um padrão idêntico ao existente nas camadas subjacentes.

A reflexão de fendas é resultado da concentração de grandes esforços na periferia da fenda, consequência do movimento dos seus bordos devido à intensidade das solicitações a que é submetido o pavimento. Estes efeitos podem ser exacerbados se à ação do tráfego juntarmos a ocorrência de variações de temperaturas, o que provoca retração térmica no pavimento.

O fenómeno de retração térmica é prejudicial na reflexão de fendas, pois as variações de temperatura diárias conduzem à variação das propriedades das camadas, como por exemplo na sua rigidez, o que provoca alterações na zona da fenda.

Abd el Halim & Razaqpur (1993), assentem que as deficiências associadas à falta de qualidade de construção do reforço podem constituir um fator de iniciação, ou de aceleração, do processo de reflexão de fendas.

Para evitar o fenómeno de reflexão de fendas em reforços de pavimentos, deve-se ter em conta algumas opções de conceção. Essas opções passam por dimensionar/projetar misturas betuminosas com maior resistência ao fendilhamento, dar prioridade à observação e medição das fendas existentes, aumentar a espessuras dos reforços, usar misturas de reforço melhoradas/modificadas com borracha de pneus por exemplo e usar intercamadas, vulgarmente referidas por SAMI (stress-absorbing membrane interlayer), da designação anglo-saxónica, que ajudam a reduzir o estado de tensão instalado no pavimento pelas ações referidas.

Propagação de fendas

De acordo com Colombier (1989), a iniciação e a evolução do fendilhamento por reflexão num reforço constituem um processo que evolui com taxas de propagação variáveis ao longo do tempo, dependendo de diversos fatores, tais como:

- Intensidade da concentração de tensões na frente de uma fenda;
- Resistência da mistura betuminosa do reforço à propagação de uma fenda;
- Características da interface entre o reforço e o pavimento existente.

Resultado destes fatores temos a ocorrência da concentração de tensões na zona da(s) fenda(s) que se desenvolve através da ação do tráfego e das variações térmicas. A ação do tráfego desenvolve na zona fendilhada esforços de flexão e de corte, e a ação das variações térmicas provoca variações de humidade no pavimento provocando também esforços de flexão e ainda de tração na zona da fenda.

Segundo Pais (1999), a propagação de uma fenda existente até à camada de reforço desenvolve-se segundo três mecanismos, nomeadamente:

1. A fase de iniciação da fenda que corresponde ao surgimento de uma fenda a partir de defeitos pré-existentes no pavimento não fendilhado ou ao ultrapassar da extensão admissível do material da camada betuminosa. Estes defeitos são na maior parte das vezes micro-fendas que aparecem logo após a compactação da mistura betuminosa no pavimento;

2. A fase de propagação lenta da fenda que corresponde à sua propagação na espessura da camada a partir do entalhe da fenda onde estão concentradas as tensões devidas às solicitações do tráfego e/ou solicitações térmicas;
3. A fase de rotura ou fase final que corresponde ao aparecimento da fenda à superfície do pavimento.

Uma possível propagação de uma fenda até à camada de reforço foi descrita por (Marchand & Goacolou (1982), como se pode observar na Figura 2.4.

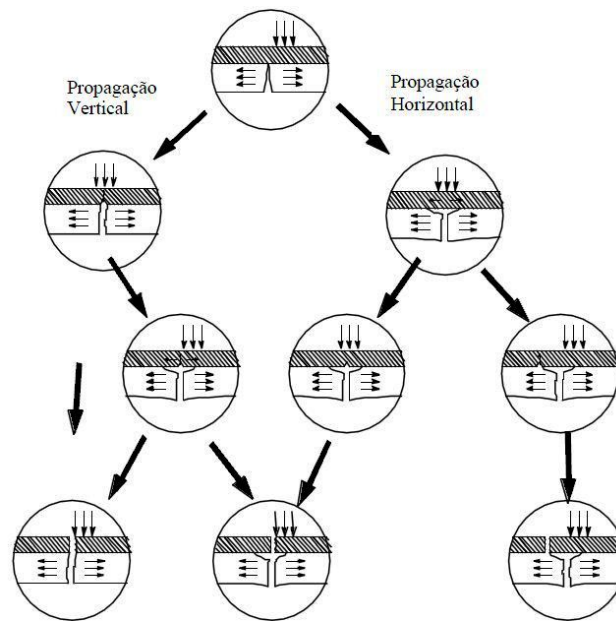


Figura 2.4 – Progressão de uma fenda para uma camada superior segundo Marchand & Goacolou (1982)

2.2.1 Consequências do fendilhamento

O fendilhamento conduz a uma diminuição das características estruturais das camadas e consequentemente provoca uma diminuição da qualidade funcional reduzindo as condições de circulação para os veículos. Esta diminuição da qualidade pode dar-se por alteração da aderência do pavimento, ser origem de outras degradações como ninhos e covas que levam a irregularidades no pavimento, más condições acústicas provocadas pelas mesmas e acima de tudo um grande desconforto e insegurança na condução.

O aparecimento do fendilhamento na superfície leva, sob o ponto de vista estrutural, à diminuição das capacidades de suporte da fundação e camadas granulares, bem como do período de vida útil do pavimento. Contudo estas não são as únicas lacunas que surgem

com o fendilhamento. Há também a infiltração de água nas camadas inferiores através das fendas o que provoca deformações permanentes. Se estas infiltrações ocorrerem em dias muito frios de inverno, podem levar ao seu congelamento dentro das fendas e com isso provocar grandes tensões no pavimento, que por sua vez provocam o agravamento das fendas existentes e podem dar origem a novas fendas.

As fendas provocam descontinuidades nas camadas que sob o efeito das cargas do tráfego aumentam as deformações nas zonas circundantes da fenda. Com isto dá-se um aumento de tensões nas camadas inferiores do pavimento, e na vizinhança das fendas provocando uma diminuição da vida útil do pavimento, uma vez que os materiais ficam sob esforços superiores, o que pode levar à rotura precoce.

2.3 Reabilitação de pavimentos

A reabilitação de um pavimento tem por objetivo melhorar um serviço aos utentes, aumentando as condições de segurança e conforto, sem perder de vista os fatores económicos, durante o seu período de vida (Azevedo, 2001).

A necessidade de proceder a uma reabilitação parte do facto de os pavimentos em serviço estarem submetidos a desgastes que afetam quer as suas funções estruturais quer funcionais. Devido às diversas solicitações a que o pavimento está afeto, este vai perdendo qualidades, tais como a textura, a aderência e mesmo características associadas ao ruído.

A reabilitação das características superficiais ou funcionais originam uma melhora no comportamento estrutural de um pavimento.

Torna-se importante distinguir a reabilitação das características superficiais das estruturas, pois a medida mais adequada a cada caso requer um diagnóstico prévio das causas das degradações atuais ou previsíveis e o conhecimento da estrutura do pavimento existente como das características dos seus materiais, do tráfego, do clima e de outros parâmetros da estrada (Azevedo, 2001).

A reabilitação de pavimentos pode ser esquematizada de acordo com a Figura 2.5, onde, para diferentes casos de fendilhamento, são apresentadas as diferentes estratégias normalmente aplicadas na reabilitação de pavimentos fendilhados.

Na Figura 2.5 pode-se observar diferentes abordagens de acordo com os diferentes níveis de fendilhamento.

Para casos de ocorrência de baixo nível de fendilhamento duas abordagens podem ser adotadas: apenas recuperação funcional ou recuperação estrutural do pavimento. Para situações de ocorrência de elevados níveis de fendilhamento, as soluções a adotar envolvem normalmente ações mais profundas (Minhoto, 2005).

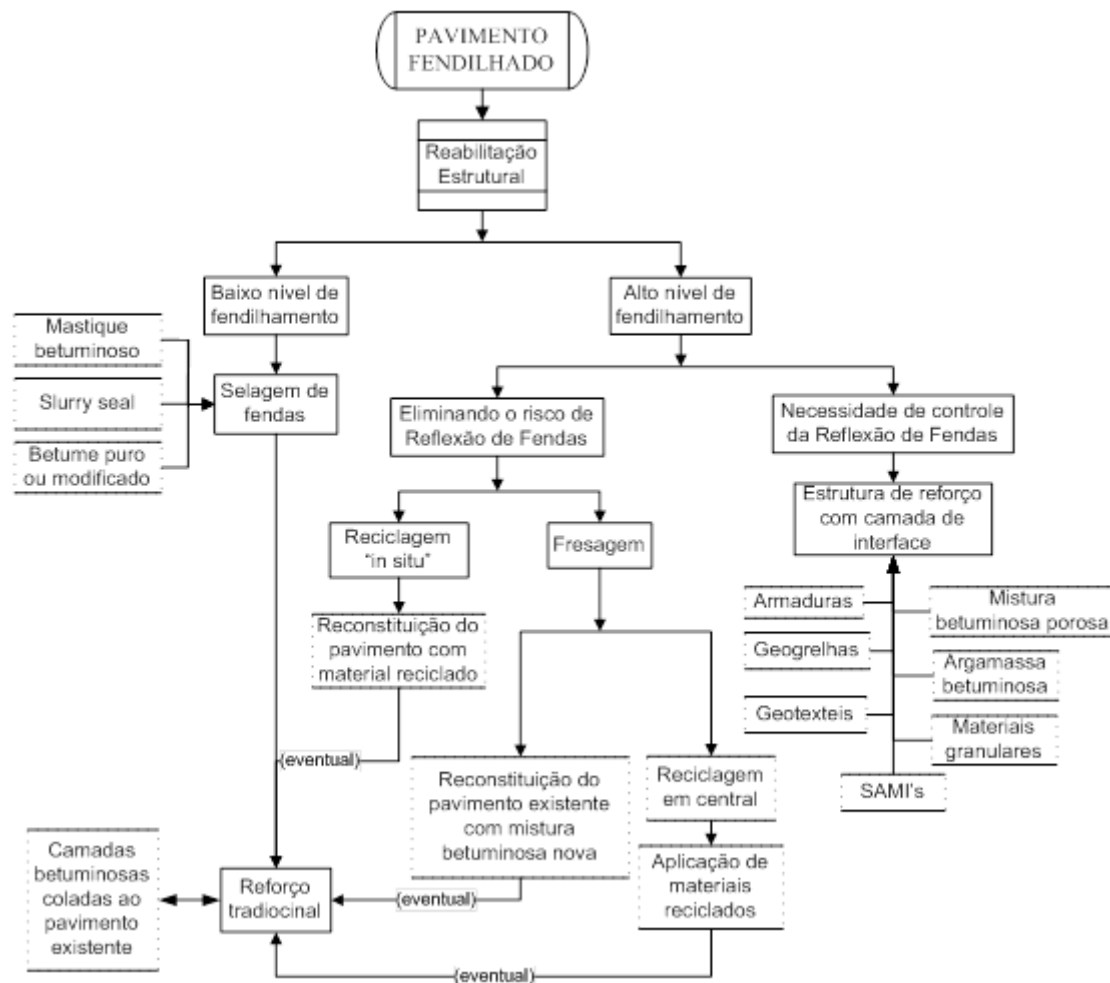


Figura 2.5 – Estratégias normalmente adotadas na reabilitação estrutural de pavimentos fendilhados (Minhoto, 2005)

2.3.1 Técnicas de reabilitação estrutural

A comodidade e segurança da construção dependem em muito das boas características superficiais. As técnicas de reabilitação superficial atuam apenas ao nível da camada de desgaste e só se devem aplicar quando os pavimentos em causa não apresentam problemas estruturais (Vicente, 2006).

Reforço

O reforço de pavimentos é o processo de reabilitação estrutural mais tradicional e mais utilizado para pavimentos rodoviários.

A principal função do reforço consiste na recuperação das características estruturais do pavimento recorrendo à execução de camadas adicionais de materiais betuminosas sobre o pavimento antigo, aumentando a capacidade estrutural e prolongando-lhe a vida útil (Jacinto, 2003).

A técnica de reabilitação com a colocação de uma camada de reforço consiste na colocação de uma ou mais camadas, de mistura betuminosa sobre o pavimento fendilhado existente, de forma a suportar as novas solicitações geradas essencialmente pela ação do tráfego. Contudo, nos casos em que a malha de fendilhamento é muito apertada, são fresadas essas camadas por se apresentarem muito degradadas, e só depois é efetuada a colocação do reforço.

Todavia existe desvantagens na aplicação desta técnica, como por exemplo no caso da aplicação em pavimentos com graves problemas estruturais, que leva a elevadas espessuras de reforço, comportando assim elevados custos tornando-se inexequível economicamente. Outra desvantagem inerente à colocação de uma camada extra é referente às cotas dos passeios e possível existência de acessos tanto a galerias técnicas como a garagens. Ainda assim, devido ao problema das cotas, pode sempre adotar-se misturas de altos módulos, geralmente levando a reduções nas espessuras das camadas.

Se não houver problemas de cotas, e caso se esteja perante um pavimento não muito fendilhado, pode-se proceder à selagem de fendas e/ou a um reperfilamento da superfície promovendo assim o preenchimento localizados devido a possíveis covas.

Reciclagem

Nos últimos anos tem-se verificado a utilização da reciclagem nos pavimentos rodoviários, que consiste na utilização de materiais usados para obtenção de novas misturas aquando da reabilitação do mesmo. Os materiais utilizados são adquiridos por fresagem do pavimento antigo a reabilitar.

Nos dias de hoje tem-se visto o aumento da utilização desta solução, pois ao utilizar materiais reciclados para novas misturas, ajuda-se a reduzir o impacto ambiental que

acarreta este tipo de obras, reduzindo assim os resíduos, e permite ainda uma redução da utilização de novos materiais, agregados e ligantes betuminosos.

A grande vantagem da reciclagem é o facto de esta eliminar por completo o fendilhamento existente, evitando assim a sua propagação.

Reconstrução

A reconstrução é também considerada uma técnica de reabilitação de pavimentos rodoviários. Esta técnica não é comum, uma vez que é necessário construir o pavimento de novo, o que é essencialmente aplicado a pavimentos que necessitem de restituir as suas condições iniciais de serviço. Normalmente aplicado quando o pavimento se encontra no estado de ruína ou bem próximo.

Esta é uma excelente técnica quando se está perante fundações com más características, em obras de alargamento de vias ou quando um pavimento está num estado grave de degradação. Neste último caso, torna-se claramente viável a reconstrução do pavimento contribuindo assim para o seu bom funcionamento futuro.

2.3.2 Reabilitação por reforço de pavimento

Os reforços de pavimento dos quais se tem conhecimento são usualmente compostos por materiais betuminosos, comumente em betão betuminoso nas camadas de desgaste e macadame betuminoso nas camadas de ligação.

Os pavimentos apresentam cada vez mais degradações prematuramente. Isto leva à procura e ao desenvolvimento de novos materiais que venham a garantir um bom desempenho estrutural e funcional e ainda que garanta a longo prazo a minimização dos custos e a prolongação da vida útil do pavimento.

Os materiais que compõem os reforços devem garantir determinados desempenhos para que no seu conjunto ofereça as condições para o qual é concebido.

Os betumes usados em pavimentação rodoviária devem apresentar características que respeitem os critérios estabelecidos nas especificações aplicáveis, de modo a que seja possível prever o seu comportamento (Branco et. al, 2008).

Misturas betuminosas

As misturas betuminosas a quente são as mais utilizadas na execução de reforços e consiste na aplicação de uma camada de regularização em macadame betuminosos e de seguida a camada de desgaste em betão betuminoso.

As misturas são produzidas a temperaturas entre os 150 e os 170 °C, de forma a obter-se a consistência adequada para o fabrico da mistura, sendo a compactação destas realizada a temperaturas mais reduzidas na ordem dos 130 a 150 °C, (Antunes, et. al, 2005).

As centrais betuminosas onde são fabricadas as misturas, recorrem a um de dois processos de produção, central continua ou descontínua.

A única diferença no processo de mistura dos materiais é o local onde é executado. Quando o processo é nas centrais contínuas, a mistura dos vários materiais é efetuado no tambor destinado à secagem e aquecimento dos materiais, por isso designado como centrais de tambor secador-misturador. Quando é na central descontínua, a operação de mistura é realizada no misturador, sendo esta a mais usual no fabrico de misturas betuminosas.

As misturas betuminosas de alto módulo, MBAM, apenas diferem das misturas betuminosas a quente no tipo de betume que é utilizado. Este é geralmente mais duro, conduzindo assim a módulos de deformabilidade mais elevados, mas no entanto a um melhor comportamento às deformações permanentes.

Quanto às centrais onde é desenvolvido o processo de mistura, é idêntico ao descrito para as misturas betuminosas a quente.

O módulo que caracteriza mecanicamente as misturas é designado por módulo de deformabilidade e este juntamente com a suas variações traduz a capacidade que as misturas têm de degradação das cargas.

A grande vantagem das misturas de alto módulo é o facto de reduzirem muito as espessuras das camadas de reforço e contudo estes serem mais duráveis. E segundo Batista (2004), há vantagens que decorrem da diminuição da espessura da camada de reforço, nomeadamente:

- Redução da utilização dos recursos naturais, agregados e betume;

- Redução dos volumes de transporte dos materiais e, consequentemente redução dos custos de transporte;
- Redução dos tempos de execução das camadas e, consequentemente, redução dos custos suportados pelos utentes, resultantes de atrasos e/ou acidentes.

Novos materiais

A necessidade da aplicação ou o começo da adição de novos materiais começa com fatores de ordem económica, ambiental e até de qualidade, constituindo assim uma solução alternativa à tradicional.

Com a introdução de novos materiais pode-se colmatar algumas necessidades e conferir às misturas uma maior flexibilidade, menor suscetibilidade térmica, resultando numa resposta eficaz a solicitações maiores que surjam e a uma maior resistência ao envelhecimento. A estas misturas chama-se misturas betuminosas com betumes modificados, sendo que o que difere deste para o tradicional é a sua composição química. Estas misturas são soluções com betumes modificados com borracha, BMB, ou betumes modificados com polímeros, PMB. A borracha é proveniente da trituração de pneus usados, e pode ser efetuada por dois processos, ambiental ou criogénica, dando origem a borracha com diferentes granulometrias e características. De acordo com Santos (2009), nos betumes modificados com borracha distinguem-se 3 tipos, que dependem da percentagem de borracha adicionada ao betume, correspondendo a:

- Betumes de alta percentagem de borracha, entre 18% e 22% em relação à massa total de ligante;
- Betumes de média percentagem de borracha, entre 8 e 15%;
- Betumes de baixa percentagem de borracha, inferior a 8%.

Em Portugal, a técnica mais utilizada e com mistura homologadas pelo LNEC será os betumes de alta percentagem de borracha. O fabrico do betume modificado com borracha compreende duas fases. Numa primeira fase o betume é aquecido a uma temperatura que ronda os 175 a 220 °C para de seguida ser adicionada a borracha. A segunda fase consiste na interação da borracha com o betume, muitas vezes designada por operação de digestão, realizada a temperaturas adequadas durante um período de digestão previamente estudado e estabelecido.

De acordo com Recipav (2004), a borracha ao entrar em contacto com o betume quente reage e fixa os maltenos, constituintes do betume, que se vão perdendo com o passar do tempo devido aos raios ultravioleta. Assim, ao mesmo tempo que fixa os maltenos, permite que as misturas betuminosas aumentem a resistência ao envelhecimento e um consequente aumento da durabilidade destas mesmas misturas betuminosas.

Em relação aos betumes modificados com polímeros, estes têm o objetivo de melhorar a elasticidade e a vulnerabilidade à temperatura das misturas betuminosas, resultando num aumento da resistência à fadiga e ainda a uma redução na reflexão de fendas e deformações permanentes.

Costa (2001) refere que os polímeros podem classificar-se em 3 grandes grupos, quanto à sua estrutura e propriedades, nomeadamente:

- Termoplásticos;
- Termo-endurecíveis;
- Elastómeros.

De acordo com Branco et. al (2008), os betumes modificados surgem para conferir às misturas betuminosas menor suscetibilidade térmica, maior flexibilidade para responder mais eficazmente a maiores solicitações do pavimento, maior resistência ao envelhecimento durante a utilização e maior eficácia de comportamento para alguns problemas funcionais, ou seja, melhoria das características de drenabilidade superficial e redução do impacto do ruído.

Técnicas anti reflexão de fendas

As técnicas anti reflexão de fendas são de um grande contributo para a melhoria da capacidade estrutural do pavimento, pois ajuda a um aumento da sua durabilidade e diminui a frequência de operações de manutenção e os custos inerentes.

Há duas técnicas primordiais que permitem retardar ou condicionar a propagação das fendas, que são, a aplicação de camadas de pequena espessura com betume modificado, SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer), ou o aumento da espessura do reforço (Vicente, 2006).

Normalmente o ligante utilizado é o betume modificado com borracha reciclada de pneus. Atendendo às características físicas e mecânicas deste material, a sua utilização

poderá ser efetuada como camada intermédia, e assim evitar a propagação das fendas (SAMI) ou como camada final de um pavimento (SAM).

Como pode observar-se na ilustração representada na Figura 2.6, a camada de SAMI funciona como dissipadora de tensões evitando a propagação da fenda do pavimento antigo, o que significa que ajuda a retardar o seu aparecimento e não a evitá-lo.

Uma das principais características desta camada anti propagação de fendas é a sua alta elasticidade e consequentemente grande capacidade de resistência à propagação das fendas.

A camada SAMI, como pode visualizar-se-se na Figura 2.6, para ter esta capacidade dissipadora e reduzir a camada de água em camadas adjacentes é aplicada entre a camada antiga do pavimento fendilhado e a camada de reforço, com espessuras na ordem dos 1 a 2 cm.

Essa interface ao ser aplicada, vai absorver os esforços elevados, não deixando que sejam transmitidos diretamente para o reforço, conseguindo-se assim retardar o desenvolvimento das fendas (fadiga e reflexão) e de deformações estruturais (Vicente, 2006).

Contudo existem muitas técnicas não mencionadas, que são cada vez mais fiáveis e têm o intuito de retardar ou condicionar a propagação das fendas. Têm a capacidade de conferir ao pavimento maior durabilidade e capacidade de carga.

Porém, sejam quais for as técnicas aplicadas, todas elas têm a mesma função, absorver parcialmente a concentração de tensões geradas entre a camada antiga e a camada de reforço.

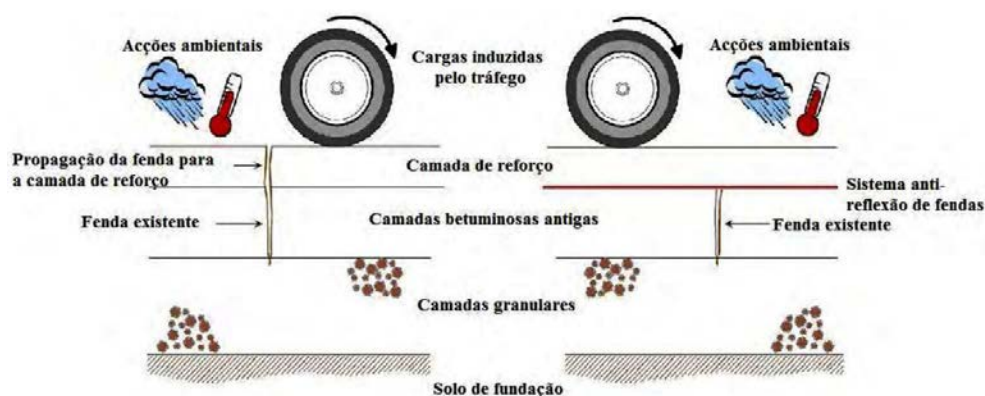


Figura 2.6 - Mecanismo de propagação de fendas e respetivo sistema anti reflexão de fendas (Antunes et. al, 2005)

Grelhas

As grelhas conduzem a benefícios no controlo de reflexão de fendas, para além de constituírem técnicas de baixo custo. São compostas por um material sintético, poliéster, polipropileno, aço e outros, com elevada resistência à tração. Estas grelhas possuem aberturas que compõem uma determinada malha, por forma a proporcionar uma boa interação com os materiais de modo a que o conjunto funcione com elevado módulo de deformabilidade.

A característica principal de ser um material sintético é a capacidade de funcionar como uma camada maleável de muito baixa rigidez, deformando-se sem fendilhar aquando da absorção das tensões induzidas pelas ações do tráfego e variações de temperatura. As grelhas são colocadas sobre o pavimento fendilhado antes da colocação da camada de reforço.



Figura 2.7- Grelhas aplicadas na reabilitação de pavimentos rodoviários (Jacinto M. A., 2011)

Geotêxtis

Os geotêxtis são mais conhecidos e utilizados na área da geotecnia. Porém a sua utilização em outras áreas da engenharia civil tem sido pertinente, principalmente na área das vias de comunicação, em particular com o efeito de retardar a propagação de fendas. A utilização deste material como solução anti reflexão de fendas consiste na aplicação de uma rega abundante com emulsão betuminosa, geralmente de betume modificado com polímeros adequados para conferir um elevado poder de adesão, sendo posteriormente estendido o geotêxtil, ficando este impregnado de betume.

O geotêxtil consiste numa malha de fios de polipropileno ou poliéster, com uma espessura bastante reduzida. De acordo com S&P Clever Reinforcement Company (2005), os geotêxtis impregnados com betume, têm as seguintes propriedades:

- Membrana intercalar de absorção de tensões (têm como objetivo principal reduzir e redistribuir as tensões);
- Selante de ingresso de água e sais;
- Barreira para evitar a ascensão de água sob forma de vapor por capilaridade;
- Compensação de pequenos deslocamentos verticais nas juntas.

Esta solução é apenas recomendável quando se estiver perante superfícies regulares, caso contrário é necessário executar uma camada de regularização e então por fim proceder à aplicação dos geotêxtis.

2.4 Conceção de reforços de pavimentos

Os métodos de dimensionamento de reforço de pavimentos, tais como os de pavimentos novos, são divididos em duas categorias, os métodos empíricos e os empírico-mecânicos, com início respetivamente nos anos 40 e 80 do século XX.

O método do CBR é um método empírico que pode ser considerado como o primeiro método de dimensionamento de pavimentos flexíveis tendo uma considerável base experimental. Este admite que a distribuição de tensões no pavimento é independente dos materiais das várias camadas, ou seja, a espessura de uma camada não depende das propriedades das camadas contíguas. O CBR deve ser considerado como um ensaio indicativo da resistência ao corte, e tem por base o conhecimento da capacidade de suporte da camada de fundação. No entanto este tipo de métodos apresenta limitações

por só poderem ser empregues em locais onde se verifiquem as mesmas condições e quando sejam utilizados os mesmos tipos de materiais (Pais, 1999) e (Lopes, 2009).

O procedimento mais eficaz para garantir a análise tendo em conta dados experimentais de solos, e as propriedades mecânicas quer dos solos como dos materiais de pavimentação é a modelagem empírico-mecanicista. Estes têm também em conta critérios para controlar o fendilhamento por fadiga, o aparecimento de deformações permanentes bem como para assegurar conforto na circulação. Principalmente a partir da década de 1970 houve uma maior utilização de métodos que procurassem compatibilizar no dimensionamento as ações solicitantes do tráfego acompanhada da análise estrutural contabilizando a capacidade dos materiais (Yoder & Witczak, 1975). Quanto à solução para problemas estruturais, através da utilização de métodos numéricos e/ou analíticos, é necessário que sejam definidas a geometria do problema, as condições de carga e deslocamento bem como as propriedades dos materiais, que usualmente determinadas em laboratório (Allen & Haisler, 1985). De entre os métodos empírico-mecânicos de dimensionamento, existe dois muito conhecidos que são, o método utilizado pela Shell (Europa), pelo Asphalt Institute (Estados Unidos). Por fim no nosso país, tem-se como referência o manual de conceção de pavimentos da JAE, o MACOPAV, que representa uma forma simples de obter as estruturas.

O dimensionamento de um pavimento recorrendo a esta metodologia, consiste em calcular o estado de tensão e deformação devido ao tráfego, fixada a geometria e as propriedades dos materiais que constituem o pavimento, verificando-se em seguida os critérios de ruína considerados no dimensionamento (Pais, 1999).

No organigrama apresentado na Figura 2.8 descreve-se um método de dimensionamento de base empírico-mecanicista desenvolvido por Sousa et al. (2002).

2.4.1 Método de dimensionamento considerando reflexão de fendas

A metodologia de conceção de reforços de pavimento proposto por Sousa et al. (2002), baseia-se num modelo empírico-mecanicista de conceção de reforços de pavimentos que contempla o critério da reflexão de fendas. Esta metodologia restringe-se a condições climáticas idênticas às observadas no estado do Arizona, USA. Esta foi validada apenas a dois seguintes tipos de misturas betuminosas:

- Mistura betuminosa convencional com granulometria densa;

- Mistura betuminosa com betume modificado com borracha com granulometria descontínua.

Este modelo foi desenvolvido com base na metodologia dos elementos finitos para ser possível a representação do fenómeno da reflexão de fendas. A calibração do modelo foi efetuada com base em medições realizadas *in situ*, em pavimentos fendilhados, com o auxílio de medidores de atividade de fendas e de deflectómetro de impacto.

Neste contexto, os autores realizaram ensaios laboratoriais para simular o movimento das fendas e das tensões observadas *in situ*, com o intuito de simular as condições reais dos pavimentos. A influência das propriedades do pavimento no estado de tensão e de extensão no reforço foi definida através de uma extensão deviatórica, do tipo de tensão de Von Mises.

As propriedades das misturas betuminosas basearam-se em ensaios de fadiga à flexão, de acordo com a norma AASHTO TP 8-94 (Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted HMA Subjected to Repeated Flexural Bending), à temperatura de 20 °C e para uma frequência de carregamento de 10 Hz.

De acordo com Minhoto (2005), os procedimentos que conduzem à aplicação do método, Figura 2.8, consistem na realização dos seguintes etapas:

- Determinação dos módulos e espessuras das camadas do pavimento existente, a partir da avaliação da deflexão obtida por FWD;
- Determinação da temperatura representativa do ar de acordo com a metodologia de conceção da Shell;
- Seleção da percentagem de fendilhamento;
- Determinação de fatores de correção, obtida através da análise dos dados observados *in situ*;
- Seleção das misturas betuminosas do reforço e respetivas propriedades mecânicas;
- Determinação do valor de projeto da extensão de Von Mises, ε_{VM} ;
- Determinação da estimativa de vida útil do reforço de pavimento.

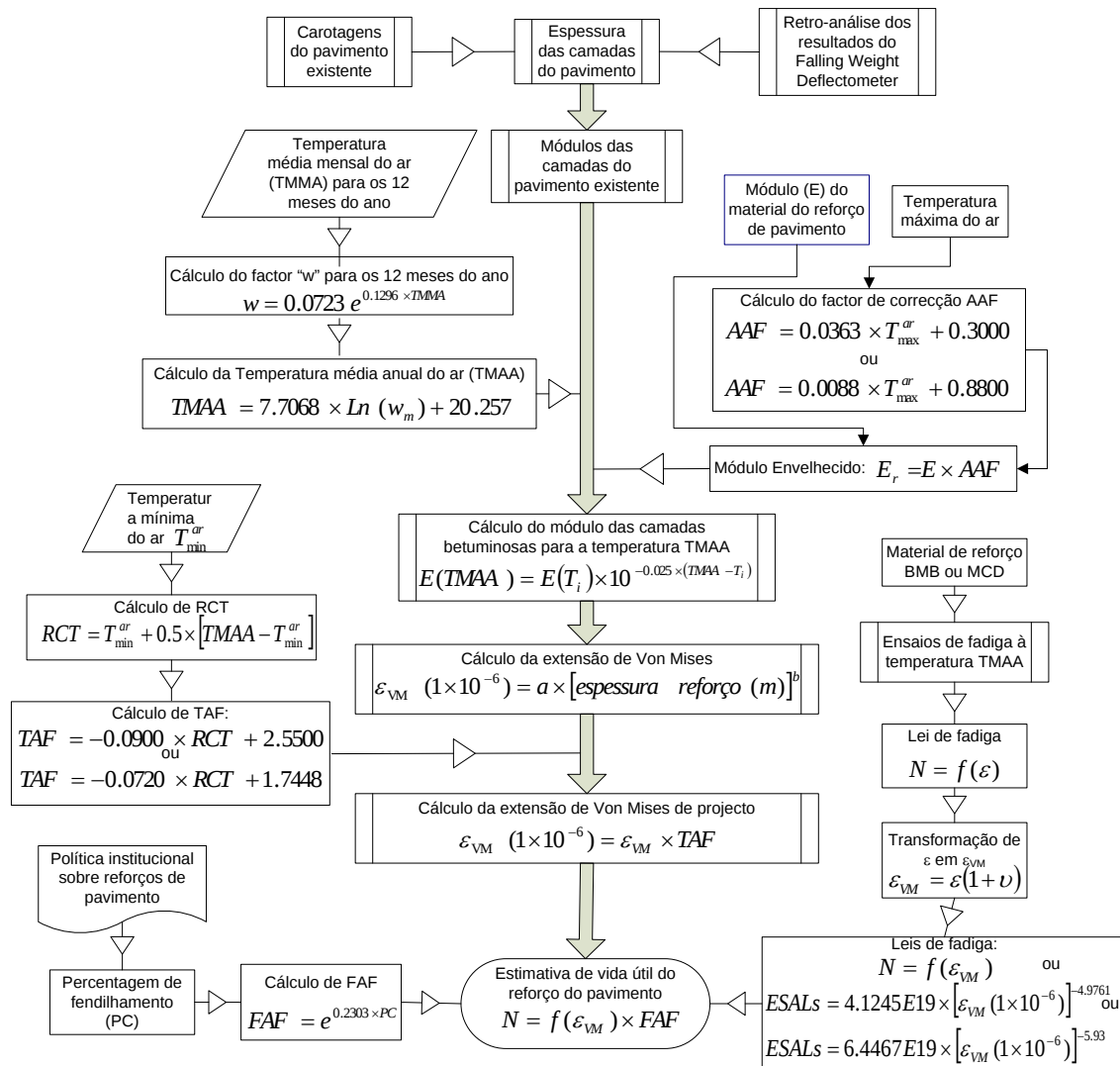


Figura 2.8 – Gráfico de fluxos representativo do método proposto por Sousa et al. (2002)

Os fatores de correção têm por objetivo incluírem na metodologia o envelhecimento das misturas betuminosas bem como o efeito da evolução da temperatura no reforço do pavimento. A extensão de Von Mises é calculada com base nos módulos de rigidez e nas espessuras das camadas de pavimento e do reforço. O procedimento final conduz ao número total de eixos-padrão que pode ser aplicado ao reforço antes de ocorrer a reflexão de fendas.

É de grande importância reter que este método pode ser aplicado considerando qualquer mistura betuminosa, desde que sejam determinadas as suas propriedades em ensaios de fadiga.

2.5 Conclusões

As degradações observadas nos pavimentos, sejam eles flexíveis ou rígidos, resultam sempre da perda de características e/ou qualidades iniciais, normalmente associadas aos materiais empregues, os quais constituem o pavimento. Para além das ações do tráfego, outros fatores interferem na evolução das degradações, designadamente as condições climáticas, em especial a temperatura, em que tudo isto é um processo cíclico levando com o tempo a degradações mais severas.

O fendilhamento é uma degradação frequente quer nos pavimentos rodoviários flexíveis quer rígidos, o que nos demonstra que não é um fenómeno exclusivo das camadas betuminosas, podendo também surgir nos pavimentos composto por betão de cimento. Normalmente, o fendilhamento é causado devido a tensões de tração resultante da fadiga. É notório que o agravamento do fendilhamento pode provocar degradações diversas progredindo para as deformações permanentes e desagregação da camada de desgaste.

Dependendo do tipo de mecanismo no processo de evolução, pode ter-se fendilhamento classificado em diversos tipos, tais como: fendilhamento por fadiga causado pela ação do tráfego; fendilhamento devido a retração térmica provocado por variações de temperatura; fendilhamento com origem na superfície e fendilhamento por reflexão de fendas que ocorre nos pavimentos reforçados. Este último tipo de fendilhamento ocorre como resultado da aplicação duma estratégia de conservação baseada numa camada de reforço e consiste num fenómeno de propagação das fendas existentes nos pavimentos antigos, reforçados, ao longo desta camada de reforço, progredindo da sua base para a superfície.

Uma forma de retardar a ocorrência desta degradação consiste na escolha de materiais de desempenho melhorado, através da colocação de uma camada constituídas por misturas tradicionais ou por misturas com betumes modificados, como por exemplo o betume modificado com borracha (BMB), acompanhada ou não da reciclagem da camada fendilhada. Pode-se ainda adotar técnicas anti reflexão de fendas que passam pela colocação de intercamadas (SAMI), constituídas por uma mistura betuminosa normalmente modificada com borracha, a utilização de grelhas ou ainda de geotêxtis. O tipo de técnica a utilizar depende da gravidade e do nível de fendilhamento que o pavimento exhibe e o tipo de nível de desempenho estrutural exigido.

No presente capítulo referencia-se um exemplo dum método de dimensionamento de reforço de pavimentos, do tipo empírico-mecanicista, proposto por Sousa et al. (2002), e que apresenta a particularidade de considerar o processo de reflexão de fendas.

3 Modelação à reflexão de fendas de reforços de pavimento

No Capítulo 3 apresentam-se as bases do estudo realizado tendo em vista a persecução dos objetivos preconizados para este trabalho. A simulação numérica do comportamento de reforços de pavimento para um conjunto de casos representativos de estruturas de reforço correntes constitui o mote principal para o uso dum modelo numérico baseado na metodologia dos elementos finitos

Pretendendo-se realizar um estudo sobre o comportamento mecânico de reforços de pavimentos rodoviários flexíveis quando o critério determinante de ruína se baseia no fenómeno da reflexão de fendas, neste capítulo descrevem-se as bases do estudo, em termos de caracterização das situações de estudo, de apresentação do modelo adotado para simulação das referidas situações e os procedimentos e metodologias adotadas para obtenção de resultados.

3.1 Descrição das situações de análise

As situações de análise adotadas no presente estudo, correspondentes a cada situação de processamento numérico, visam representar possíveis configurações dum reforço de pavimento suscetíveis de ocorrerem como soluções de reabilitação e resultam da combinação de espessuras de camadas, tipos e propriedades dos materiais e tipos de pavimentos fendilhados. Nestas possíveis configurações de reforço são também contempladas situações de sistemas de reforço com e sem intercamadas (do tipo SAMI) e para a camada de reforço foram adotadas duas misturas diferentes, uma mistura betuminosa convencional e uma mistura betuminosa modificada com borracha - BMB. As situações de análise assim resultantes são, por sua vez, combinadas com as possíveis configurações de fendilhamento permitidas pela configuração geométrica e mecânica do modelo numérico usado.

Na tabela 3.1 apresentam-se os valores de base para a definição de situações de simulação, ao nível das espessuras e propriedades numéricas, associadas a cada camada de pavimento incluída na modelação numérica. Nesta tabela, relativamente à camada de reforço, adotaram-se módulos de valor igual a 2000 MPa, 4000 MPa e de 10000 MPa para simular uma gama de módulos associados a uma gama de temperaturas passíveis de ocorrer em pavimentos da região de Bragança.

Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais, adaptado (Shatnawi et al., 2011)

Variáveis		Valores
Camada de reforço	Espessura	2, 6 e 12 cm
	Módulo de Deformabilidade, E	2000 ; 4000 ; 10000 MPa
Camada de SAMI	Espessura	0 e 1 cm
	Módulo de Deformabilidade, E	$E_x=E_y=35$; $E_z=100$; MPa
	Módulo de Distorção, G	$G_{xy}=G_{yz}=14$; $G_{xz}=40$ MPa
Camada Fendilhada (Flexível)	Espessura	7,5 e 15 cm
	Módulo de Deformabilidade, E	2000 e 4000 MPa
Camada Fendilhada (Rígido)	Espessura	20 cm
	Módulo de Deformabilidade, E	20000 MPa

Com base na combinação destes parâmetros foram determinadas 93 situações de simulação, das quais 72 são referentes a pavimentos flexíveis e as restantes 21 situações a pavimentos rígidos. As situações de simulação estão agrupadas nas tabelas 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6.

Tabela 3.2 – Situações de simulação em pavimento flexíveis fendilhados

Pavimento Flexível	Designação	Sit	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Reforço (desg.+reg)	Esp.	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12
		Módulo	2000	2000	2000	4000	4000	4000	10000	10000	10000
	SAMI	Esp									
	Cam. Fendilhada	Esp	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075
		Módulo	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
	Base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		Módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	Sub-base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	Fundação	Módulo	35	35	35	35	35	35	35	35	35
	Designação	Sit	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Reforço (desg.+reg)	Esp.	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12
		Módulo	2000	2000	2000	4000	4000	4000	10000	10000	10000
	SAMI	Esp	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Cam. Fendilhada	Esp	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075
		Módulo	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
	Base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		Módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	Sub-base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	Fundação	Módulo	35	35	35	35	35	35	35	35	35

Tabela 3.3 – Situações de simulação em pavimento flexíveis fendilhados

Pavimento Flexível	Designação	Sit	19	20	21	22	23	24	25	26	27
	Reforço (desg.+reg)	Esp.	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12
		Módulo	2000	2000	2000	4000	4000	4000	10000	10000	10000
	SAMI	Esp									
	Cam. Fendilhada	Esp	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
		Módulo	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
	Base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		Módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	Sub-base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	Fundação	Módulo	35	35	35	35	35	35	35	35	35
	Designação	Sit	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	Reforço (desg.+reg)	Esp.	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12
		Módulo	2000	2000	2000	4000	4000	4000	10000	10000	10000
	SAMI	Esp	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Cam. Fendilhada	Esp	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
		Módulo	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
	Base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		Módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	Sub-base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	Fundação	Módulo	35	35	35	35	35	35	35	35	35

Tabela 3.4 – Situações de simulação em pavimento flexíveis fendilhados

Pavimento Flexível	Designação	Sit	37	38	39	40	41	42	43	44	45
	Reforço (desg.+reg)	Esp.	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12
		Módulo	2000	2000	2000	4000	4000	4000	10000	10000	10000
	SAMI	Esp									
	Cam. Fendilhada	Esp	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075
		Módulo	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
	Base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		Módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	Sub-base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	Fundação	Módulo	35	35	35	35	35	35	35	35	35
	Designação	Sit	46	47	48	49	50	51	52	53	54
	Reforço (desg.+reg)	Esp.	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12
		Módulo	2000	2000	2000	4000	4000	4000	10000	10000	10000
	SAMI	Esp	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Cam. Fendilhada	Esp	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075
		Módulo	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
	Base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		Módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	Sub-base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	Fundação	Módulo	35	35	35	35	35	35	35	35	35

Tabela 3.5 – Situações de simulação em pavimento flexíveis fendilhados

Pavimento Flexível	Designação Sit		55	56	57	58	59	60	61	62	63
	Reforço (desg.+reg)	Esp.	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12
		Módulo	2000	2000	2000	4000	4000	4000	10000	10000	10000
	SAMI	Esp									
	Cam. Fendilhada	Esp	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
		Módulo	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
	Base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		Módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	Sub-base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	Fundação	Módulo	35	35	35	35	35	35	35	35	35
	Designação Sit		64	65	66	67	68	69	70	71	72
	Reforço (desg.+reg)	Esp.	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12
		Módulo	2000	2000	2000	4000	4000	4000	10000	10000	10000
	SAMI	Esp	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Cam. Fendilhada	Esp	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
		Módulo	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
	Base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		Módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	Sub-base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	Fundação	Módulo	35	35	35	35	35	35	35	35	35

A Tabela 3.6 é refere-se às situações de pavimentos rígidos com utilização ou não da camada de SAMI e aquando da utilização desta a diferença entre a organização das espessuras do reforço, ou seja a espessura abrangida pela camada de regularização e pela camada de desgaste.

Na avaliação do comportamento dos reforços de pavimento à reflexão de fendas, nas condições expressas nas situações descritas, é necessário estabelecer as condições de fendilhamento a que vão estar sujeitos, usando diversos os tipos de malha de fendilhamento permitidos pelo modelo de MEF e baseando-se na conclusão de que a pele de crocodilo é o tipo de fendilhamento mais gravoso. A simulação da ocorrência de fendilhamento por parte do modelo numérico que mais se assemelha a este tipo de fendilhamento é a configuração em malha quadrada com diversas larguras.

Assim, as diversas situações de fendilhamento são representadas por malhas de fendilhamento quadradas, umas com a primeira fenda, paralela ao xx, a iniciar-se na fenda par, localizada no plano do eixo do veículo e outras com a primeira fenda, paralela ao mesmo eixo a localizar-se na fenda ímpar a 10 cm do plano do eixo do veículo.

Tabela 3.6 – Situações da composição de pavimentos rígidos

Pavimento Rígido	Designação		Sit	73	74	75	76	77	78	79	80	81			
	Reforço (desg)	Esp.	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12				
		Módulo	2000	2000	2000	4000	4000	4000	10000	10000	10000				
	SAMI		Esp												
	Reforço (Reg.)	Esp.	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
		Módulo	2000	2000	2000	4000	4000	4000	10000	10000	10000				
	Cam. Fendilhada	Esp	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2				
		Módulo	2E+04	2E+04	2E+04	2E+04	2E+04	2E+04	2E+04	2E+04	2E+04				
	Base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1				
		Módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270				
	Sub-base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1				
		módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270				
	Fundação	Módulo	35	35	35	35	35	35	35	35	35				
	Designação		Sit	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
	Reforço (desg)	Esp.	0,01	0,03	0,06	0,01	0,03	0,06	0,01	0,03	0,06	0,09	0,09	0,09	
		Módulo	2000	2000	2000	4000	4000	4000	10000	10000	10000	2000	4000	10000	
	SAMI		Esp	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Reforço (Reg.)	Esp.	0,01	0,03	0,06	0,01	0,03	0,06	0,01	0,03	0,06	0,03	0,03	0,03	
		Módulo	2000	2000	2000	4000	4000	4000	10000	10000	10000	2000	4000	10000	
	Cam. Fendilhada	Esp	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
		Módulo	2E+04	2E+04	2E+04	2E+04	2E+04	2E+04	2E+04	2E+04	2E+04	2E+04	2E+04	2E+04	
	Base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
		Módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	
	Sub-base	Esp	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
		módulo	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	
	Fundação	Módulo	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	

A configuração dos diversos tipos de malha possíveis de simular pela modelação numérica está esquematizada na Figura 3.1. As malhas de fendas foram estabelecidas de modo a abranger o maior número possível de hipóteses de estudo e representatividade o mais próxima possível do que sucede na realidade no pavimento. Foram estudados nove tipos de malha diferentes, que vão das mais apertadas às mais largas, compreendidas entre os 10 cm e os 90 cm de largura de quadrícula, respetivamente.

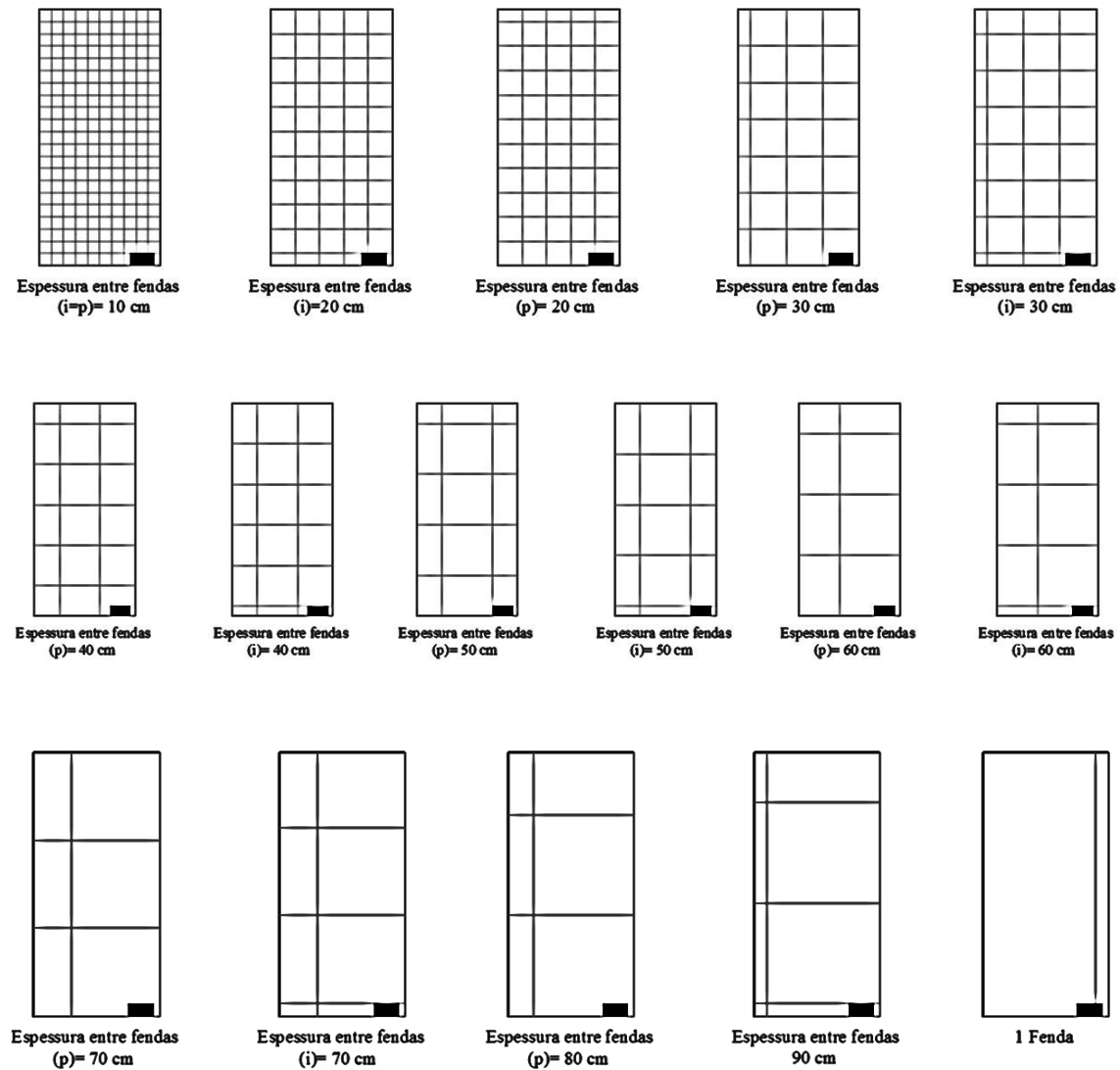


Figura 3.1 – Representação das malhas de fendilhamento em estudo;

3.2 Modelo Numérico

Foi utilizado uma modelação através do método dos elementos finitos utilizando o *software ANSYS® Academic Teaching Introductory, Release 14.0*. No presente trabalho será efetuada uma análise sob condições de carga/carregamento estática(o) e usando uma modelação elástico-linear do comportamento dos materiais caracterizado pela rigidez.

3.2.1 Princípios de modelação e comportamento da estrutura do pavimento

A modelação numérica foi baseada no método dos elementos finitos, direcionada para a análise estrutural de estruturas de pavimentos, prevendo a inclusão de fendilhamento,

prevendo a introdução duma camada de reforço e de uma camada de interface – SAMI – sob a aplicação dum rodado duplo dum eixo padrão de 80kN. Esta modelação contempla a análise numérica do comportamento mecânico de pavimentos rodoviários flexíveis e rígidos.

Os resultados obtidos, após o processamento de todas as situações de análise, consistem nas tensões/extensões desviatórias nos nós envolvidos na avaliação do comportamento à reflexão de fendas e que se localizam acima da fenda principal (entre os rodados), na zona das camadas constituintes do reforço. Independentemente do facto de ter ou não a camada de interface, este conjunto de nós está inserido em uma camada do modelo, quer se esteja a analisar pavimentos rodoviários fendilhados flexíveis ou rígidos.

Os sistemas de reforço contemplados no modelo são caracterizados em termos de:

- Espessura;
- Módulo de rigidez - da camada de reforço e da camada do pavimento fendilhado;
- Possuir ou não camada de SAMI – qual o incremento;
- Tipo de mistura betuminosa utilizada, convencional ou com BMB.

Quando se está perante um pavimento flexível fendilhado, a camada de interface é colocada entre este e a camada de reforço. Quando se está perante um pavimento rígido, a camada de interface é colocada entre a camada de regularização e a de desgaste do reforço.

3.2.2 Descrição do Modelo

O modelo de elementos finitos utilizado para o desenvolvimento do trabalho nesta dissertação é uma versão tridimensional do modelo numérico usado no estudo apresentado em Shatnawi et al. (2011) denominado por “*Asphalt Rubber Interlayer Benefits on Reflective Crack Retardation of Flexible Pavement Overlays*” desenvolvido pelo autor.

Trata-se dum modelo numérico baseado na metodologia dos elementos finitos, vocacionado para análises estruturais estáticas, no domínio tridimensional, incorporando modelos de comportamento elástico-linear dos materiais, uma vez que se considera que o carregamento mecânico é de curta duração e, como tal, as propriedades

mecânicas atribuídas aos materiais betuminosos, em particular o módulo de deformabilidade, são associadas ao comportamento elástico-linear e definidas para uma frequência de carregamento adequada (por exemplo de 10Hz).

Descrição da geometria

A caracterização geométrica do modelo base consistiu na atribuição de dimensões ao modelo que conduzissem à melhor representação do comportamento real duma parte dum pavimento rodoviário de acordo com o representado na Figura 3.2. Pelo facto de existir simetria geométrica e mecânica relativamente a planos verticais paralelos aos eixos dos xx e dos yy , o modelo foi reduzido a 25% (Figura 3.2) das dimensões horizontais consideradas na modelação e representada na Figura 3.3. Em termos de definição vertical, este modelo geométrico é definido como um conjunto de camadas horizontais às quais são atribuídas espessuras e propriedades mecânicas, constituindo a base para as configurações do pavimento adequadas para a simulação de cada caso de estudo. A espessura adotada para a camada de fundação foi obtida através dum processo de convergência de modo a que o pavimento (não fendilhado) apresentasse um comportamento idêntico aos modelos correntes que consideram a fundação como uma camada semi-definida e semi-infinita, tendo-se efetuado a referida convergência com simulações efetuadas como programa BISAR®.

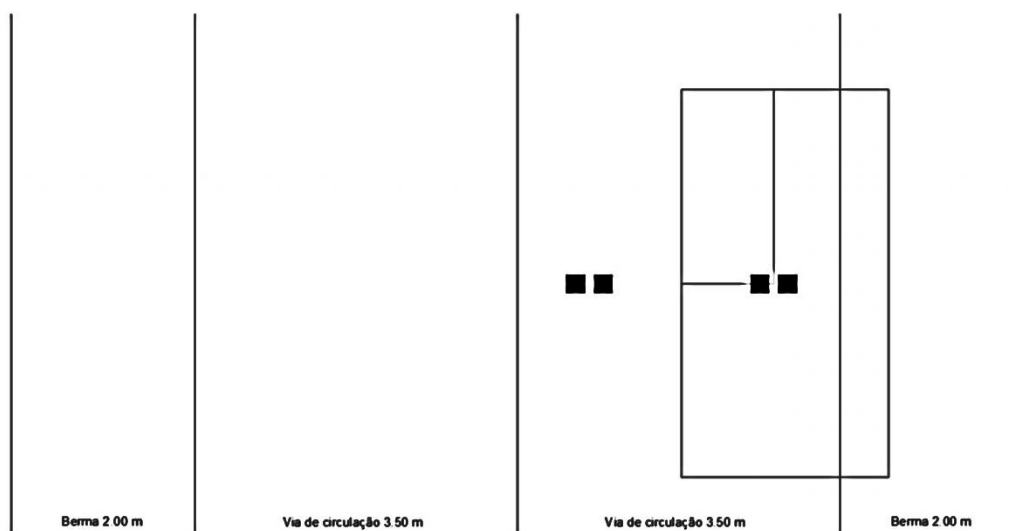


Figura 3.2 – Representação esquemática da área a analisar – secção retangular mais pequena (Pais et. al, 2012)

A área de análise é uma área retangular assinalada na Figura 3.3, a azul, representativa do carregamento exercido. O carregamento está assinalado como uma pequena área a preto. Esta representa a parte do rodado que influencia aquela área de pavimento.

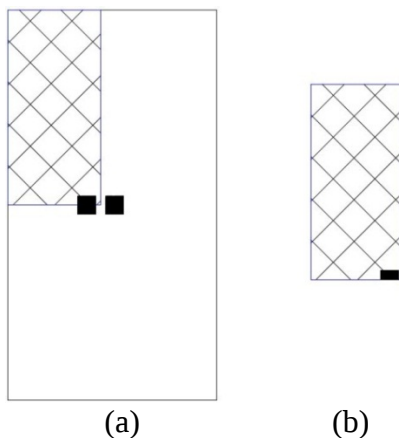


Figura 3.3 – (a) Representação esquemática da área de influência de um rodado; (b) Representação de 25% da área influenciada pelo rodado de acordo com o eixo de simetria;

Na Figura 3.3b representa-se a localização da carga dum rodado duplo padrão (Shell) que irá ser considerada no modelo, sendo que neste corresponde a 25% da carga total exercida no pavimento de acordo com a simetria do eixo do veículo. A área de pavimento a analisar foi modelada com 7 camadas. As camadas são as seguintes:

- Reforço do pavimento fendilhado;
- SAMI – intercamada que ajuda a dispersar as tensões sentidas pelo pavimento devido aos consecutivos carregamentos;
- Camada de regularização;
- Camada de pavimento fendilhado;
- Camada de base granular;
- Camada de sub-base granular;
- Solo de fundação.

As camadas de base, sub-base e de fundação têm como espessuras, módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson valores sempre iguais independentemente da situação de pavimento a analisar.

Definição da malha de elementos finitos

O modelo mecânico baseia-se na discretização do modelo geométrico, resultando a configuração mecânica apresentada na Figura 3.4, na qual se destacam duas zonas distintas de malhagem, uma com malhagem regular (mapped) e outra com malhagem livre (free).

A malhagem livre é uma malhagem não uniforme e foi utilizada para definir melhor o solo de fundação, as camadas de base e sub-base granular. A malhagem das restantes camadas e de maior importância para o presente estudo foram definidas como malhagem regular que é uma definição mais regular e rígida que a anterior, como se observa na Figura 3.4. Estas camadas são muito mais discretizadas pois assim conduz a resultados mais fidedignos.

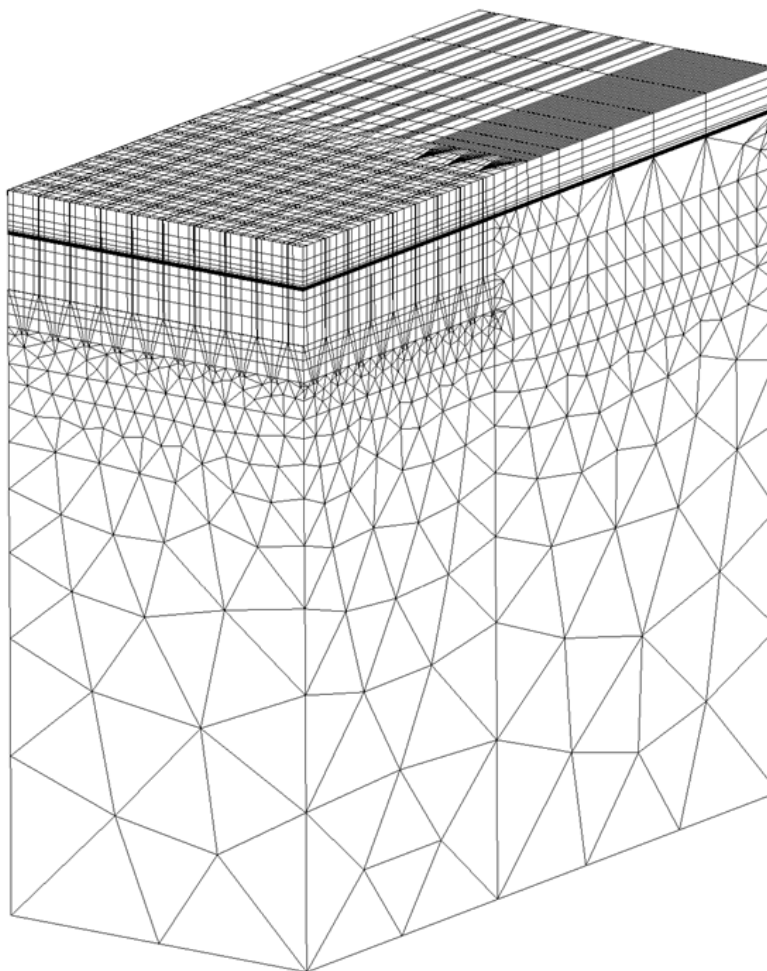


Figura 3.4 – Aspeto do resultado da discretização do modelo mecânico do pavimento

A discretização foi baseada em dois tipos de elementos, o “SOLID 185” e o “SOLID 186, o que de acordo com Help System, SOLID185, ANSYS, Inc. e Help System, SOLID186, ANSYS, Inc. descrevem-se como:

- Elementos paralelepipedicos, de baixa-ordem, de oito nós (do tipo SOLID185 - com três graus de liberdade cada (U_x , U_y , U_z) (Figura 3.5a), exibindo interpolação linear de deslocamentos entre nós, usados na malhagem regular das zonas do modelo que estão na base da configuração dos diversos casos de estudo (zonas das camadas, das fendas e da aplicação das cargas)
- Elementos paralelepipedicos, de alta-ordem, de 20 nós (do tipo SOLID186 - com três graus de liberdade cada (U_x , U_y , U_z) (Figura 3.5b), exibindo interpolação quadrática de deslocamentos entre nós, para malhagem livre em zonas do modelo representativas da fundação e de zonas com menor influência no comportamento do reforço em análise. Este facto conduz a que este elemento esteja configurado para assumir configurações tetraédricas e piramidais na fronteira entre as zonas de malhagem regular e de malhagem livre.

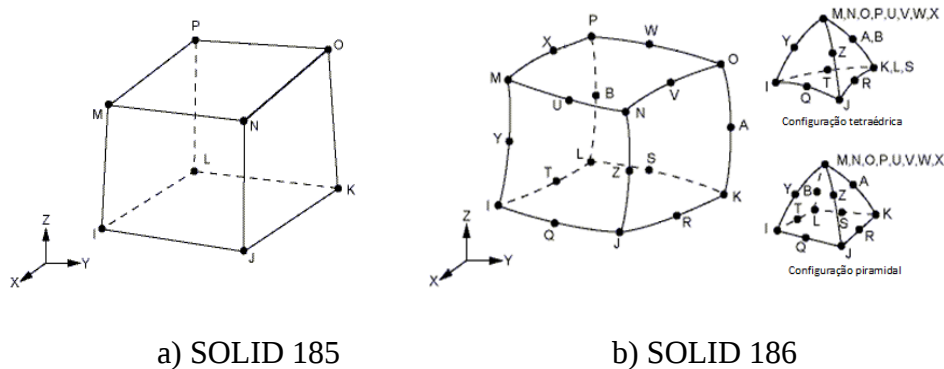


Figura 3.5 – Elementos usados na discretização do modelo (Help System, SOLID185, ANSYS, Inc.) e (Help System, SOLID186, ANSYS, Inc.)

Este tipo de elementos possibilita a modelação de materiais ortotrópicos e de materiais com comportamento não linear.

Os materiais são caracterizados por duas constantes independentes entre si, que são o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Estas características são introduzidas aquando da definição do tipo de material de cada camada. Para classificar um material

ortotrópico como é a camada de SAMI é necessário introduzir uma terceira incógnita que é o módulo de distorção, G .

Definição das condições fronteira e cargas aplicadas

Antes de definirmos o carregamento a que estará sujeito o pavimento modelado, é importante estabelecer as condições de contorno, ou seja, quais os deslocamentos permitidos ou restringidos, na base dos três graus de liberdade, UX, UY, UZ.

As condições fronteira aplicadas ao modelo foram estabelecidas de modo a representar as condições reais de apoio do pavimento e garantindo que a consideração da redução geométrica e mecânica do modelo, devido à simetria de cargas e de geometria, conduza aos mesmos resultados que o modelo considerado integralmente. Assim, foram aplicadas restrições de rotação e deslocamento horizontal em todos os nós das superfícies envolventes do modelo, exceto na superfície superior representativa da superfície do pavimento.

A definição das solicitações a aplicar ao modelo envolve a definição duma carga vertical, distribuída na superfície do pavimento, representativa da aplicação dum rodado duplo de um eixo de 80 kN com a configuração preconizada pela metodologia de dimensionamento da Shell.

Processamento do modelo

A análise numérica realizada com o modelo apresentado, para avaliação do efeito dum carregamento dum eixo-padrão, é do tipo estacionário para cada caso de simulação, envolvendo apenas um único processamento, e efetua o processamento cujo diagrama de fluxo se apresenta na Figura 3.6. Em cada processamento numérico é gerado um ficheiro de resultados contendo todos os elementos definidores do estado de tensão/extensão resultantes das condições de carregamento. Concretamente são produzidas as componentes (normais e tangenciais) de tensão/extensão e as componentes principais de tensão/extensão, e com estas são calculados os valores de extensão de Von Mises.

3.3 Procedimentos de Simulação de cada situação de análise

Para a concretização dos objetivos do presente trabalho é necessário definir o procedimento de análise a que se propõe os resultados obtidos pelo *software* ANSYS®.

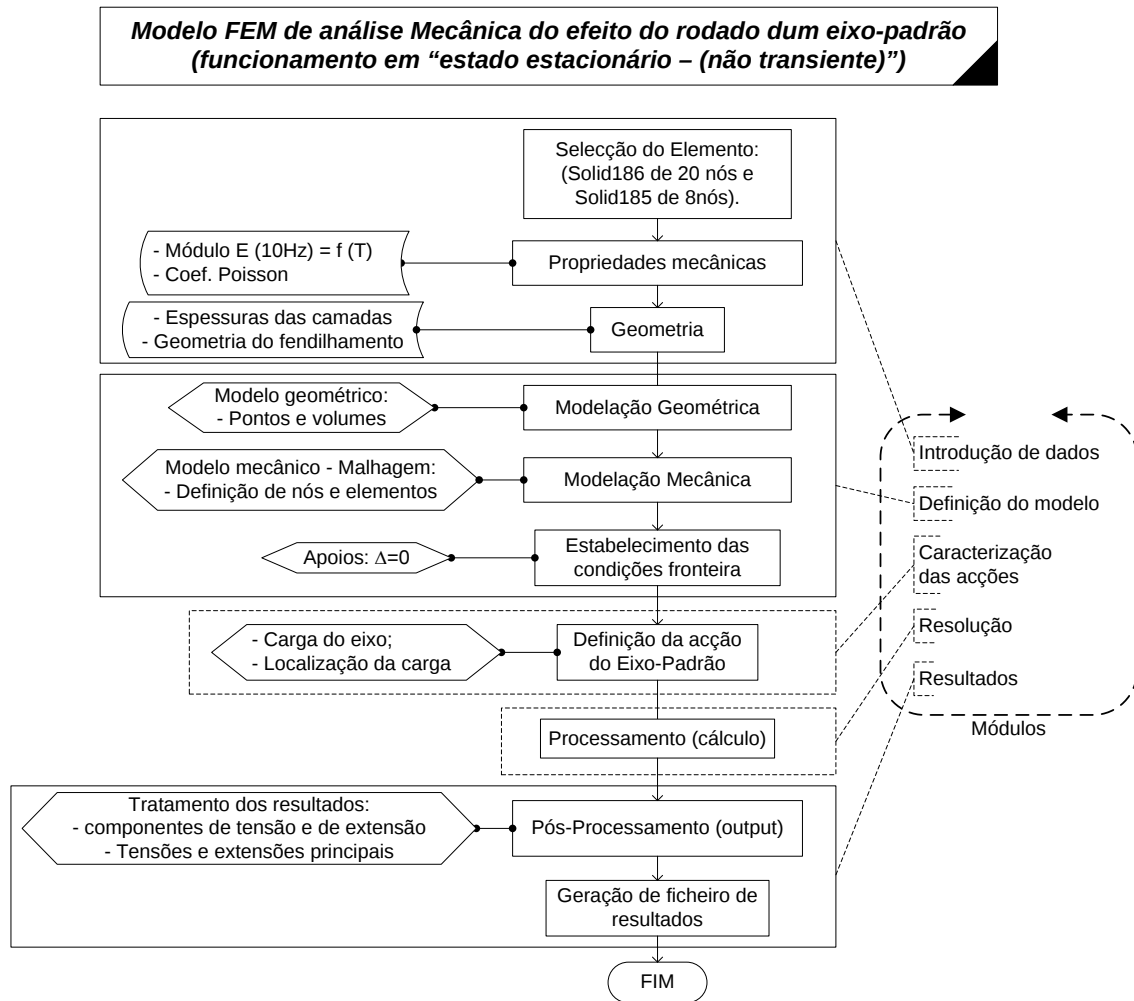


Figura 3.6 – Diagrama de fluxo representativo do processamento do modelo adotado;

Numa primeira fase do estudo procedeu-se ao estabelecimento dos valores dos parâmetros necessários à caracterização e descrição das situações dos pavimentos para análise, Figura 3.7. Na Figura 3.8 apresentam-se os procedimentos executados tendo por objetivo este fim. Relativamente às camadas granulares, para o caso de estudo, as características mecânicas mantêm-se independentemente de se estar a tratar de pavimento rodoviários flexíveis ou rígidos. Na Tabela 3.7 estão descritas as características mecânicas das camadas granulares.

As estruturas de pavimento adotadas para o estudo resultaram da estipulação das propriedades mecânicas dos materiais e das espessuras das camadas superiores. Foi necessário introduzir estes dados no modelo de comportamento mecânico para proceder à simulação. Da simulação obtêm-se os valores das extensões principais que caracterizam o que se passa nos nós acima da fenda, e com estes são calculados os valores de extensão de Von Mises. Com estes resultados procede-se a uma média para

obter um valor representativo das camadas significativas para o estudo do comportamento do pavimento.

Tabela 3.7 – Características mecânicas das camadas granulares dos pavimentos em estudo

Camada de Base	Espessura, [m]	0,10
	Módulo, [Mpa]	270
Camada de Sub-base	Espessura	0,10
	Módulo, [Mpa]	270
Fundação	Módulo, [Mpa]	35

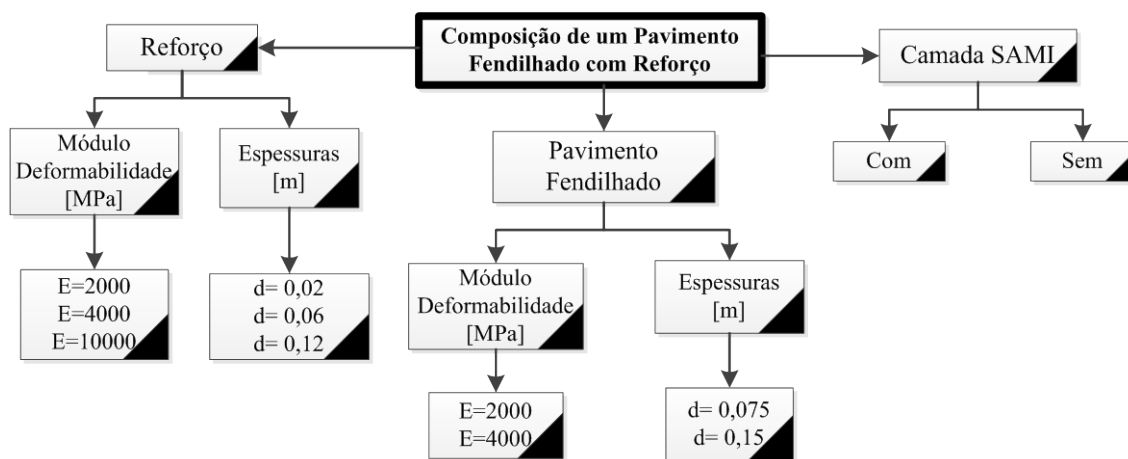


Figura 3.7 - Propriedades mecânicas dos materiais e das espessuras das camadas superiores

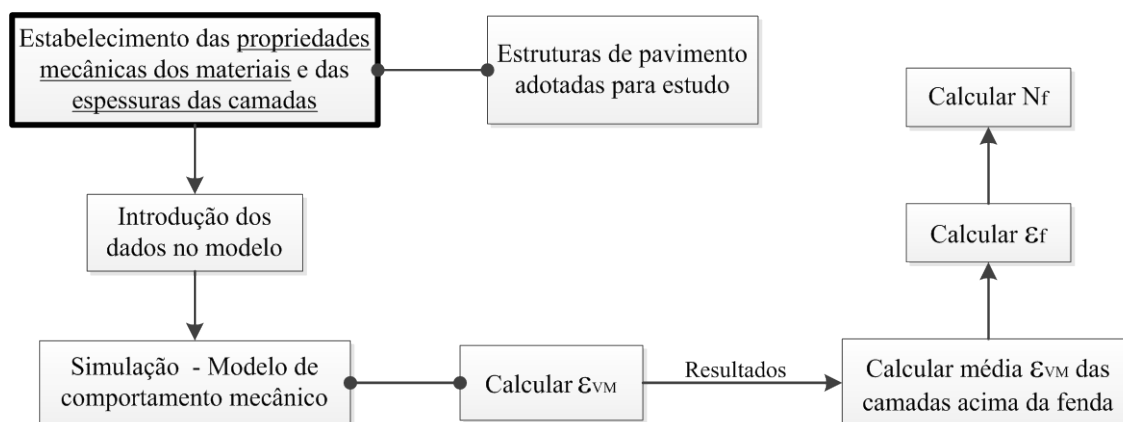


Figura 3.8 – Procedimento realizado para obtenção dos resultados

O procedimento de simulação a adotar visa a avaliação do comportamento mecânico do reforço aplicado num pavimento fendilhado. No estudo apenas considera-se a aplicação da carga do tráfego e as propriedades dos materiais que compõe essas camadas.

A influência das propriedades do pavimento no estado de tensão e de extensão do reforço é estabelecida através destas extensões deviatórias, que são designadas como “Extensão de Von Mises”, ε_{VM} , de acordo com a expressão 3.1:

$$\varepsilon_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \left((\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 \right)} \quad (5.1)$$

Em que:

- ε_{VM} – Extensão de Von Mises;
- $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – Extensões principais.

A resistência à fadiga é expressa em função da extensão de tração, e esta pode ser relacionada com a extensão de Von Mises, através da expressão 3.2:

$$\varepsilon_{VM} = \varepsilon_f (1 + \nu) \quad (5.2)$$

Em que:

- ε_{VM} – Extensão de Von Mises;
- ε_f – Extensão de tração;
- ν - Coeficiente de Poisson.

A expressão obtida através do processamento numérico (Ref^a ANSYS®) relaciona-se com os restantes parâmetros através da expressão 3.3, o que corresponde a uma conjugação das duas expressões anteriores, 3.1 e 3.2.

$$\varepsilon_{VM}^{ANSYS} = \varepsilon_f = \left(\frac{1}{1 + \nu} \right) \sqrt{\frac{1}{2} \left((\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 \right)} \quad (5.3)$$

Para determinar a previsão da vida à fadiga (n.º de ciclos), podem ser utilizados vários modelos. O modelo escolhido foi o da Shell, que relaciona a resistência à fadiga com a extensão de tração e a rigidez da mistura betuminosa, através da expressão 3.4, proposta por Claussen et al. (1977).

$$N_f = \left(\frac{\varepsilon_t}{(0.856V_b + 1.08)E^{-0.36}} \right)^{-5} \quad (5.4)$$

Em que:

- N_f – Resistência à fadiga;
- ε_t – Extensão de tração;
- E – módulo de deformabilidade da mistura betuminosa;
- V_b – Volume de betume da mistura betuminosa.

Todavia foi decidido mais oportuno utilizar uma expressão geral baseada no modelo de fadiga da Shell, que foi ajustada tendo em conta resultados de ensaios laboratoriais referentes a uma conjunto de misturas utilizadas em Minhoto (2005). Essa equação é apresentada de uma forma generalizada na expressão 3.5.

$$N_f = \left(\frac{\varepsilon_t}{(aV_b + b)E^{-c}} \right)^{-d} \quad (5.5)$$

Em que:

- N_f – Resistência à fadiga;
- ε_t – Extensão de tração;
- E – módulo de deformabilidade da mistura betuminosa, [Pa];
- V_b – Volume de betume da mistura betuminosa, [%];
- a, b, c e d – coeficientes ajustáveis aos ensaios realizados (Minhoto, 2005).

O valor referente ao volume de betume, V_b , para a mistura convencional é de 10,8%, enquanto para a mistura com BMB é de 17,5% (Minhoto, 2005). Quanto aos valores dos coeficientes adotados quer para a mistura convencional quer para a mistura com betume modificado com borracha, apresentam-se na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Coeficientes da lei da Shell adotados para as misturas estudadas

Coeficientes	Mistura Convencional	Mistura com BMB
a	1,009	1,957
b	0,928	0,926
c	0,337	0,434
d	3,961	6,941

Independentemente da posição a que se encontra a camada de SAMI no conjunto do pavimento, ter-se-á de analisar extensões em uma camada na zona acima da fenda, como pode observar-se na Figura 3.9 e na Figura 3.10.

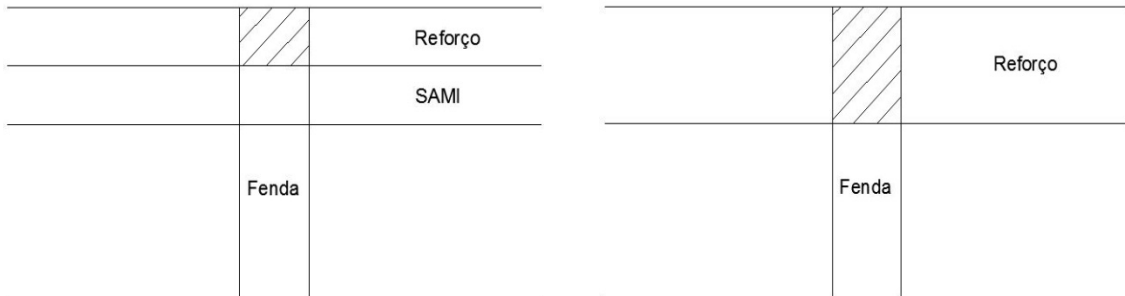


Figura 3.9 – Representação das camadas a analisar acima da fenda – pavimento flexível

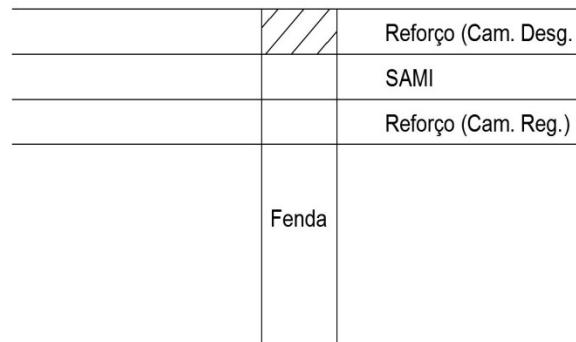


Figura 3.10 - Representação das camadas a analisar acima da fenda – pavimento flexível

Nos pavimentos rodoviários flexíveis ou rígidos, mesmo que contenha camada de SAMI, apenas se analisa uma camada, a do reforço do pavimento, Figura 3.9. Relativamente aos pavimentos rígidos, analisa-se também apenas uma camada, esta refere-se à camada de desgaste do reforço, representada na Figura 3.10.

3.4 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas as propriedades dos materiais que iriam constituir as diversas situações a analisar através do *software* de análise. Com a combinação destes parâmetros chegamos a um total de 93 situações de análise que representam as diferentes composições de pavimentos. Para a solução de reforço foram consideradas duas misturas diferentes, uma mistura convencional e uma mistura com BMB.

Com base na metodologia dos elementos finitos, utilizando o *software* ANSYS®, foi descrita neste capítulo a modelação de uma área de pavimento de modo a analisar o

comportamento do reforço de pavimentos fendilhados, flexíveis e rígidos, através da leitura das tensões e extensões dos resultados obtidos pelo mesmo. Este modelo simula o comportamento mecânico do pavimento com base na caracterização dos materiais utilizados, das solicitações a que está submetido e de acordo com a sua geometria. Como resultados do modelo mecânico, são lidos os valores das extensões principais e deviatóricas, que são os valores das extensões de tração e desta maneira determina-se a vida à reflexão de fendas do reforço de pavimento.

4 Análise do comportamento de reforços de pavimentos

A análise que se apresenta desenvolve-se com base nos resultados obtidos do processamento da modelação numérica das 93 situações de simulação apresentadas anteriormente. Deste processamento resultou um conjunto de resultados que permitiu efetuar um tratamento no sentido de expressar os mesmos em termos de extensões médias de Von Mises, ε_{VM} , na zona do reforço localizada acima da fenda principal. Para efeitos do presente estudo aceita-se a consideração de que esta extensão deviatória traduz a influência das propriedades do pavimento, em termos de estado mecânico representativo, no fenómeno de reflexão de fendas, de acordo com o proposto por Sousa et al. (2002).

Neste sentido é apresentada inicialmente uma análise de resultados em termos de extensão de Von Mises, seguida duma análise em termos de vida previsível à reflexão de fendas, baseada esta na proposta duma caracterização da resistência à fadiga dos tipos de materiais adotados.

4.1 Análise baseada em extensões de Von Mises

Neste subcapítulo analisam-se e comparam-se as diferentes situações de comportamento dum reforço com base nos resultados expressos em termos de extensões de Von Mises, ε_{VM} , para situações em que a camada betuminosa fendilhada flexível e rígida se apresenta com apenas uma fenda.

Na Figura 4.1 apresentam-se os gráficos com os resultados referentes às situações de sistemas de reforço com SAMI em comparação aos sem SAMI, que exprimem os resultados das simulações numéricas envolvendo a variação de espessuras do reforço, e_r , (2 cm, 6 cm e 12 cm), e dos módulos, E_r , (2000, 4000 e 10000 MPa), em função da variação do módulo, E_f , e da espessura, e_f , da camada fendilhada. Estes resultados foram obtidos a partir de simulações em modelo com apenas uma fenda.

Da análise deste conjunto de gráficos, constata-se que o aumento do módulo e da espessura do material do reforço conduz à redução da extensão de Von Mises, ε_{VM} , para qualquer das condições, de módulo e espessura, possíveis, da camada fendilhada, o que significa que a vida previsível à reflexão de fendas dos pavimentos reabilitados com reforço de 12 cm em relação ao de 6 e 2 cm será maior, o que vai de encontro à

percepção que se tem acerca deste tipo de soluções, adquirida pela pesquisa bibliográfica efetuada.

Da mesma análise constata-se que as condições adotadas para a camada fendilhada não condicionam significativamente os resultados da análise, embora se constate um ligeiro decréscimo da extensão de Von Mises para maiores espessuras desta camada, podendo-se, neste contexto, inferir da pouca influência da espessura e do módulo desta camada no comportamento à reflexão de fendas do reforço.

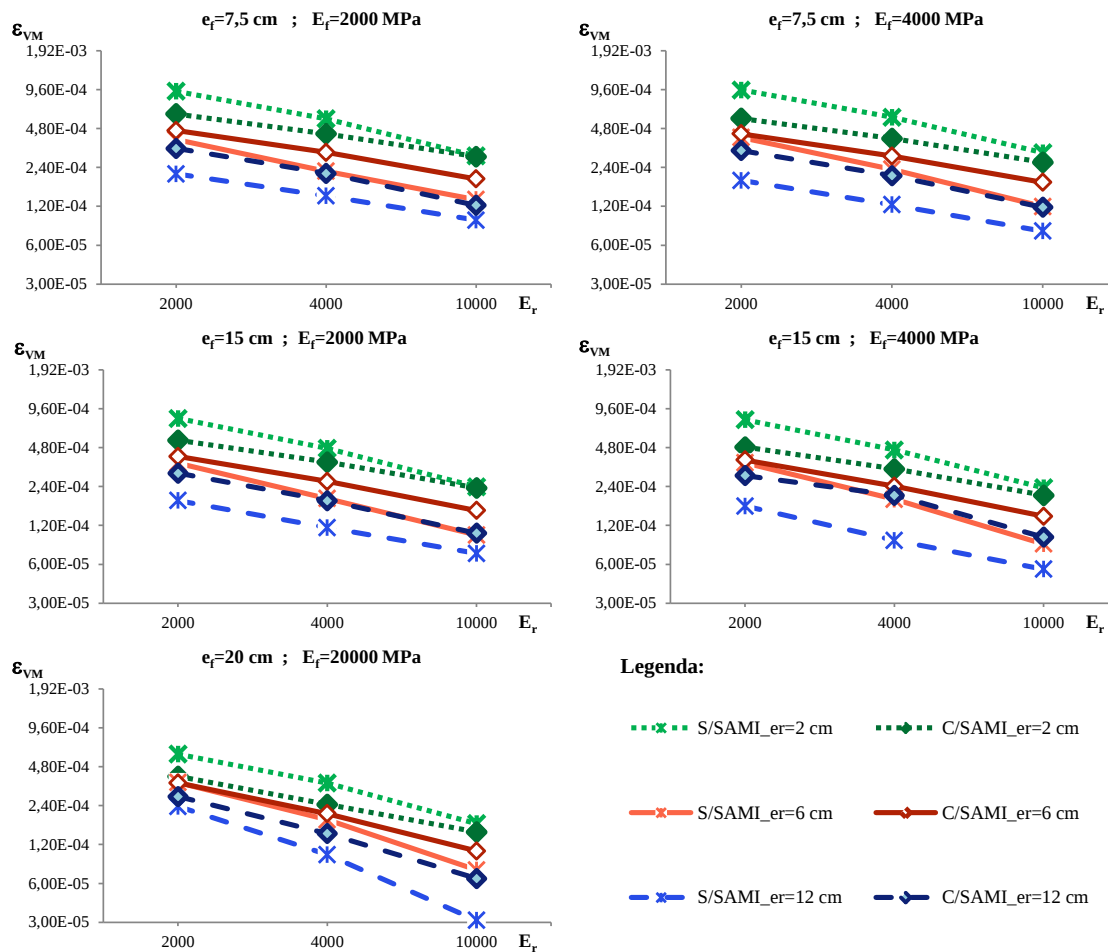


Figura 4.1 - Extensão de Von Mises para diversas situações de reforço, aplicado num pavimento fendilhado com uma fenda, com e sem SAMI

Através de uma análise da figura 4.1, é possível constatar-se que para pequenas espessuras de reforço, 2 cm, os valores de ϵ_{VM} da solução com SAMI são inferiores quando comparados com os sem SAMI, perspetivando que a vida previsível do reforço para aquele caso seja maior, o que converge com a expectativa inicial do estudo.

Relativamente às maiores espessuras, 6 e 12 cm, verificam-se resultados antagónicos, ou seja, os valores de ε_{VM} da solução com SAMI são superiores comparativamente aos sem SAMI, levando a que a vida previsível à reflexão de fendas conduza a conclusões diferentes das do caso de espessuras de 2 cm. Este comportamento é observado em qualquer um dos pavimentos fendilhados em estudo. Neste contexto, nos casos em que a espessura do reforço assume valores de 6 e 12 cm, com a colocação duma intercamada, constata-se resultados que divergem da percepção que se tem do comportamento deste tipo de soluções obtida do processo de pesquisa bibliográfica.

Esta análise dos resultados constantes na figura 4.1 impõe uma reflexão sobre a adequabilidade do modelo usado para a inclusão de intercamadas (a) e da pertinência da metodologia de avaliação da resistência à reflexão de fendas para estes casos (b). A acrescentar a esta análise, é importante referir que apenas foi considerado um tipo de intercamada de SAMI, o que não invalida que SAMI's com outras características possam conduzir a resultados diferentes.

Na figura 4.1 constata-se ainda que quanto maior as espessuras de reforço utilizadas, menores são as extensões obtidas, o que conduz a que a vida previsível à reflexão de fendas seja tanto maior, quanto maior a espessura, independentemente da rigidez do pavimento fendilhado e nas situações com SAMI e sem SAMI. O comportamento do reforço melhora com o aumento do seu módulo e do módulo do pavimento fendilhado, no entanto a diferença de valores entre eles é pequena. Constata-se que também há melhorias do comportamento do reforço, embora pouco evidentes, quando se está perante as mesmas espessuras de pavimento fendilhado, mas com módulos diferentes e vice-versa. Isto leva-nos a concluir que quer a espessura como o módulo do pavimento fendilhado condiciona os resultados do comportamento do reforço.

No presente estudo, quer a fundação como as camadas granulares foram mantidas com as mesmas características para os dois tipos de pavimentos fendilhados, rígidos e flexíveis. Esta condição pode ser condicionante para os resultados obtidos. Ou seja, o facto de a fundação ser a mesma pode ser uma das principais causas para que o comportamento do reforço entre pavimentos de rigidez diferente seja semelhante.

4.2 Análise de resultados quanto a soluções de reforço

Para análise dos resultados numa perspetiva de avaliação quanto às soluções de reforço, apresenta-se um conjunto de gráficos em que a comparação dos casos de estudo se efetua com base na vida previsível à reflexão de fendas (n° de ciclos), determinada a partir dos valores de ε_{VM} usando a metodologia proposta por Sousa et al (2002) e determinada para os tipos de material em análise, ou seja, MC – mistura betuminosa convencional – e BMB – mistura betuminosa modificada com betume de borracha. Neste contexto, a determinação da vida previsível do reforço foi efetuada a partir das extensões de Von Mises e aplicando as leis de fadiga para os referidos materiais, apresentadas no capítulo anterior, obtidas por regressão a partir dum conjunto de resultados de ensaios de fadiga efetuados no âmbito do trabalho de Minhoto (2005).

À semelhança do capítulo anterior, a apresentação dos resultados da simulação numérica centraliza-se predominantemente no comportamento das diversas soluções de reforço aplicadas em camadas fendilhadas com uma fenda. A referida análise apresenta-se organizada em dois domínios, apresentadas em dois subcapítulos, concretamente, quanto ao tipo de material constituinte do reforço e quanto à existência ou não de intercamada de absorção de tensões. Devido às suas várias vantagens no que diz respeito ao aumento da vida útil do reforço (Shatnawi et al., 2011), considerou-se pertinente introduzir este tipo de solução no estudo realizado, apresentada no subcapítulo 4.2.2.

4.2.1 Análise quanto ao material constituinte do reforço

Na figura 4.2 apresenta-se o comportamento de reforços com 2cm de espessura, constituídos por mistura convencional e por mistura com BMB, para diversas situações de análise, expresso em termos de vida previsível à reflexão de fendas, para situações de reforço sem SAMI, quando aplicado sobre pavimentos fendilhados, rígido e flexíveis, com uma fenda.

Pela análise do gráfico pode-se constatar, claramente, que a utilização de uma BMB conduz a melhores resultados de vida à reflexão de fendas do que a mistura convencional, quer quando seja o reforço aplicado a pavimentos fendilhados flexíveis ou rígidos.

Para o mesmo nível de fendilhamento, é possível constatar que quando o pavimento fendilhado apresenta maior rigidez, a vida à reflexão de fendas do reforço é maior. Desta mesma análise é possível verificar que quanto maior a espessura e módulo do pavimento fendilhado, maior a diferença de resultados entre as duas misturas, BMB e MC, sendo sempre a BMB a mistura que conduz a valores superiores.

A figura 4.3 e a figura 4.4 apresentam o mesmo tipo de resultados que a figura 4.2 com a diferença que estas representam a vida à reflexão de fendas de reforços com espessuras de 6 cm e 12 cm, respetivamente.

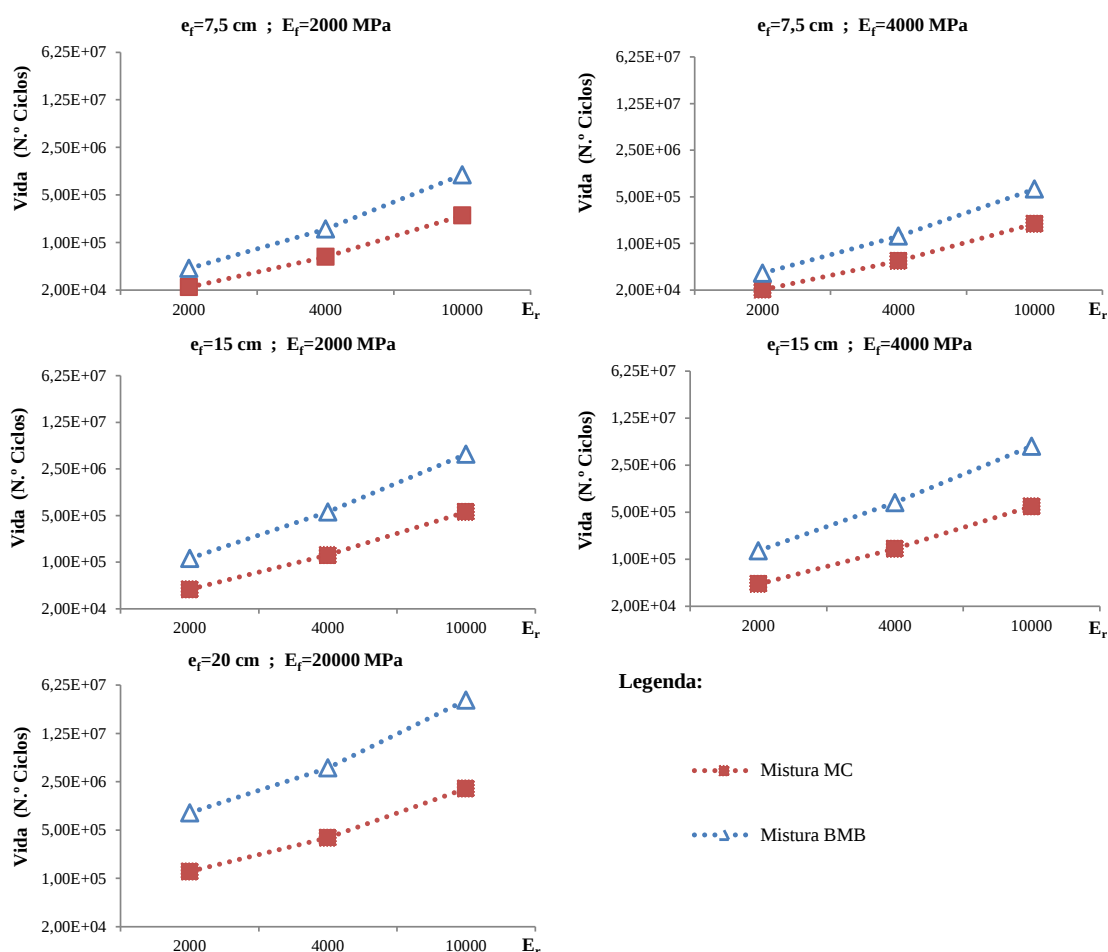


Figura 4.2 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 2 cm, aplicado num pavimento fendilhado com uma fenda

Comparando a vida previsível do reforço para situações de pavimento fendilhado com a mesma espessura e sem variar a espessura do reforço, constata-se que em situações com módulo maior (rígidos) se constata que a vida à reflexão de fendas do reforço é maior, ou seja, o mesmo reforço tenderá a exibir melhor desempenho quando aplicado em

pavimentos fendilhados rígidos. Esta constatação é mais evidente na figura 4.4, o comportamento do reforço quando aplicado ao pavimento rígido fendilhado apresenta valores de vida à reflexão de fendas mais elevados que os restantes.

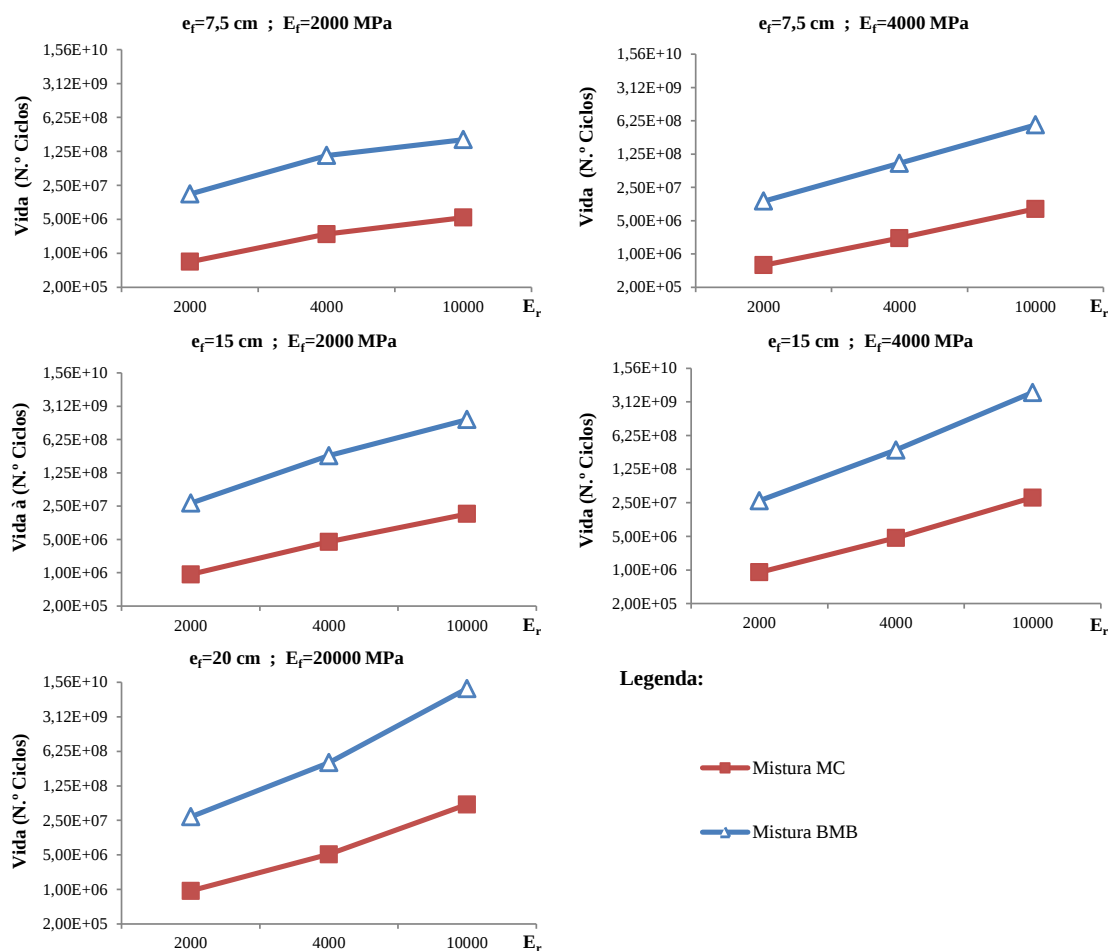


Figura 4.3 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 6 cm, aplicado num pavimento fendilhado com uma fenda

Constata-se ainda nestes gráficos que o do número de ciclos de carga (vida previsível) associado à maioria das situações estudadas apresenta valores excessivos quando comparados com valores de vida à fadiga correntemente observados em processos de dimensionamento corrente de pavimentos (a rondar valores entre 10^6 e 10^7) e de reforços.

A análise deste aspeto leva-nos a concluir da necessidade de colocar algumas reservas no que diz respeito quer ao uso das leis de fadiga adotadas e aplicadas, quer à assunção pragmática da metodologia de representação do comportamento da reflexão de fendas baseada no uso da extensão média de Von Mises, propondo-se que se deva usar de alguma moderação na extrapolação dos resultados obtidos em termos de vida previsível

para outros contextos. Num contexto de dissertação esta seria uma linha de investigação considerada de interesse científico.

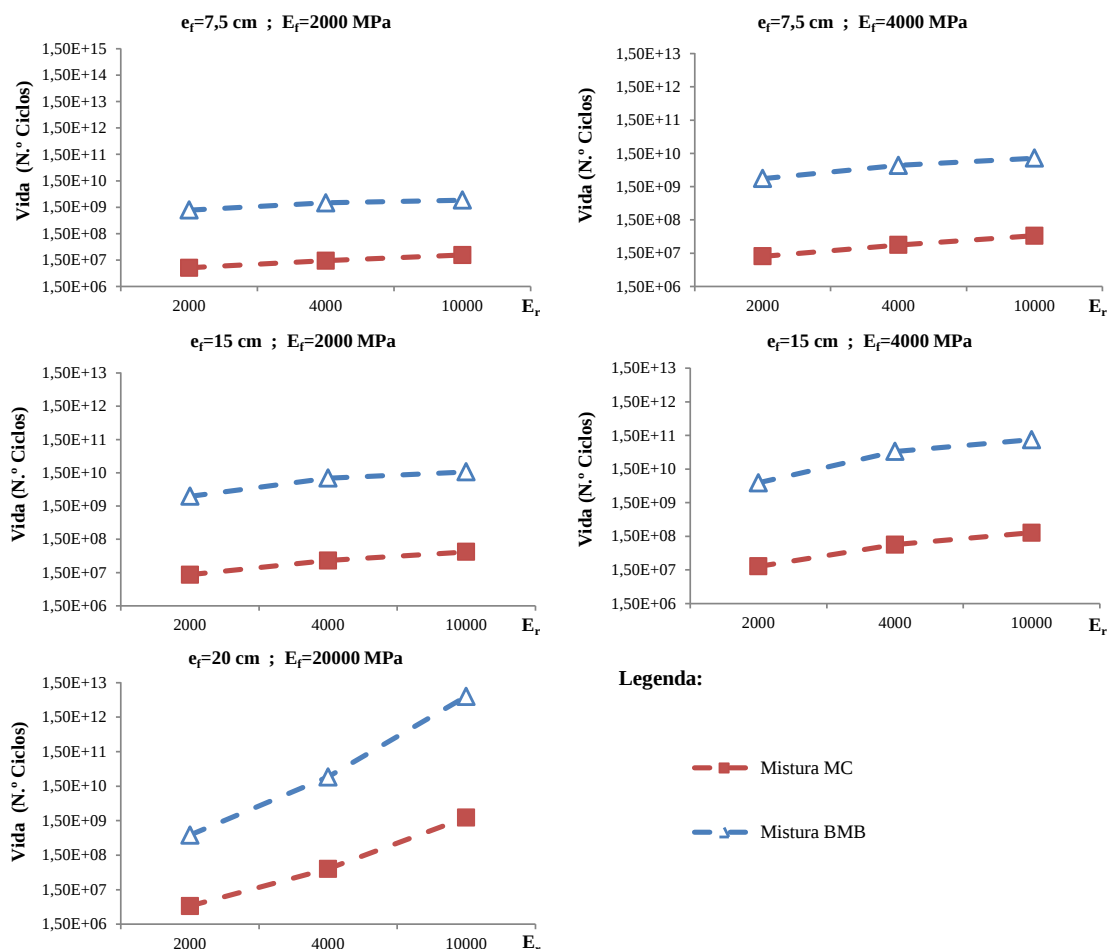


Figura 4.4 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 12 cm, aplicado num pavimento fendilhado com uma fenda

Através da figura 4.6 conclui-se que a grande diferença observada entre a 2, 6 e 12 cm de reforço, foi a nível da gama de valores de vida obtidos, sendo mais elevada para reforços mais espessos.

No sentido de alargar a análise do comportamento do reforço a condições de fendilhamento generalizado, apresentam-se na figura 4.6 os resultados obtidos para diversos casos de simulação, expressos em termos de extensões de Von Mises, considerando condições de multifendilhamento generalizado que se consideram mais gravosas. Neste sentido, o gráfico da figura 4.7 apresenta as extensões de Von Mises às quais a aplicação de leis de fadiga conduz aos piores valores de vida à fadiga do reforço, para os cinco pavimentos em estudo, relativamente às espessuras e módulos do reforço sem SAMI. Em cada um dos gráficos da figura 4.6 estão representados as extensões

para as três espessuras de reforço com a indicação da malha de fendilhamento a que correspondem.

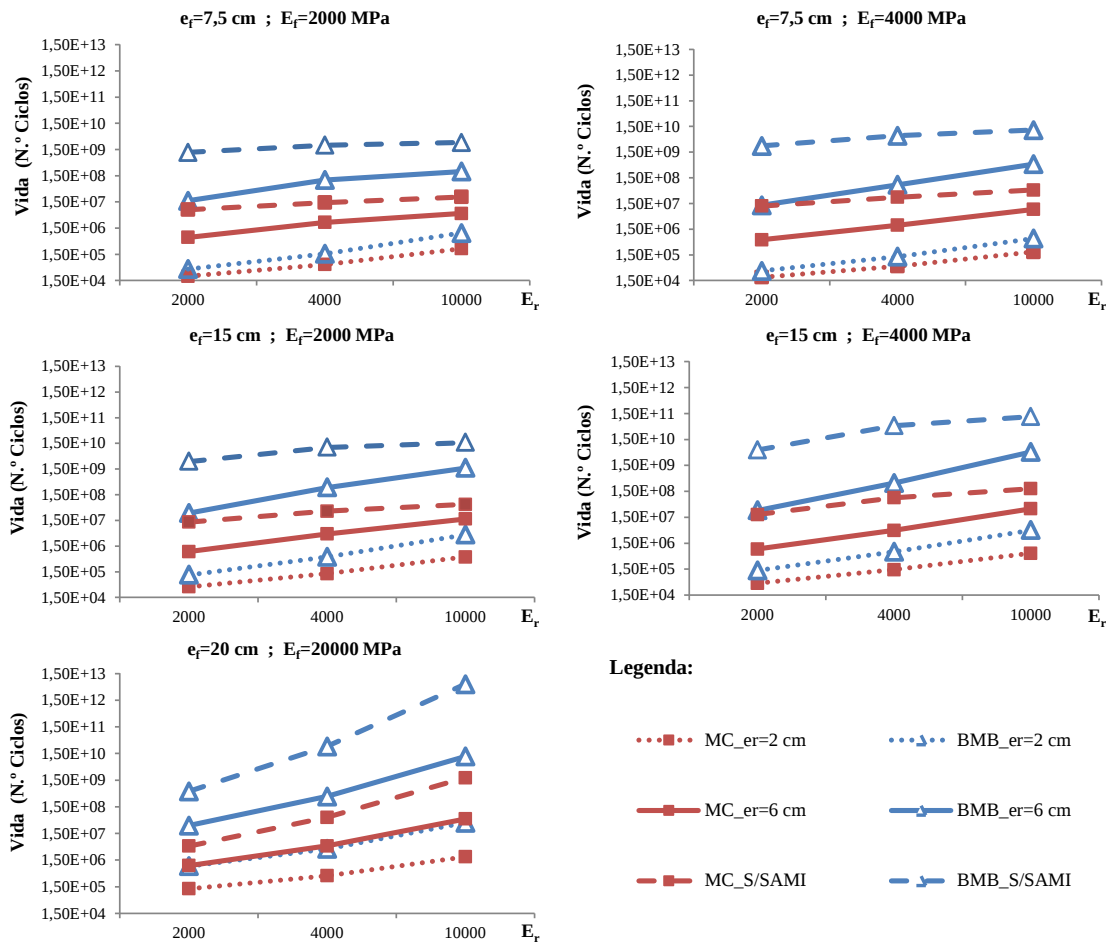


Figura 4.5 – Comparação de valores de vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 2, 6 e 12 cm, aplicado num pavimento fendilhado com uma fenda

Constata-se pela análise do gráfico que o nível de fendilhamento conducente a estas extensões não é sempre o mesmo para as espessuras de 2 e 6 cm de reforço. Já para a maior espessura de reforço, 12 cm, o nível de fendilhamento é sempre o mesmo, com uma malha de #10 independentemente do tipo de pavimento fendilhado. Tal era esperado em todas as espessuras de reforço, por ser um nível acentuado de fendilhamento, de todos o mais grave entre os estudados.

A figura 4.7, figura 4.8 e figura 4.9 representam a vida à reflexão de fendas do reforço tendo por base a diferença de comportamento entre as duas misturas em estudo.

Através da análise destas três figuras é possível perceber qual o comportamento do reforço para as duas misturas em estudo nos casos de fendilhamento que originam os

piores valores de vida à reflexão de fendas. É também possível constatar em que situações é que estas misturas levam aos piores valores de vida à reflexão de fendas quando aplicados na camada de reforço com estas características (espessuras e módulos).

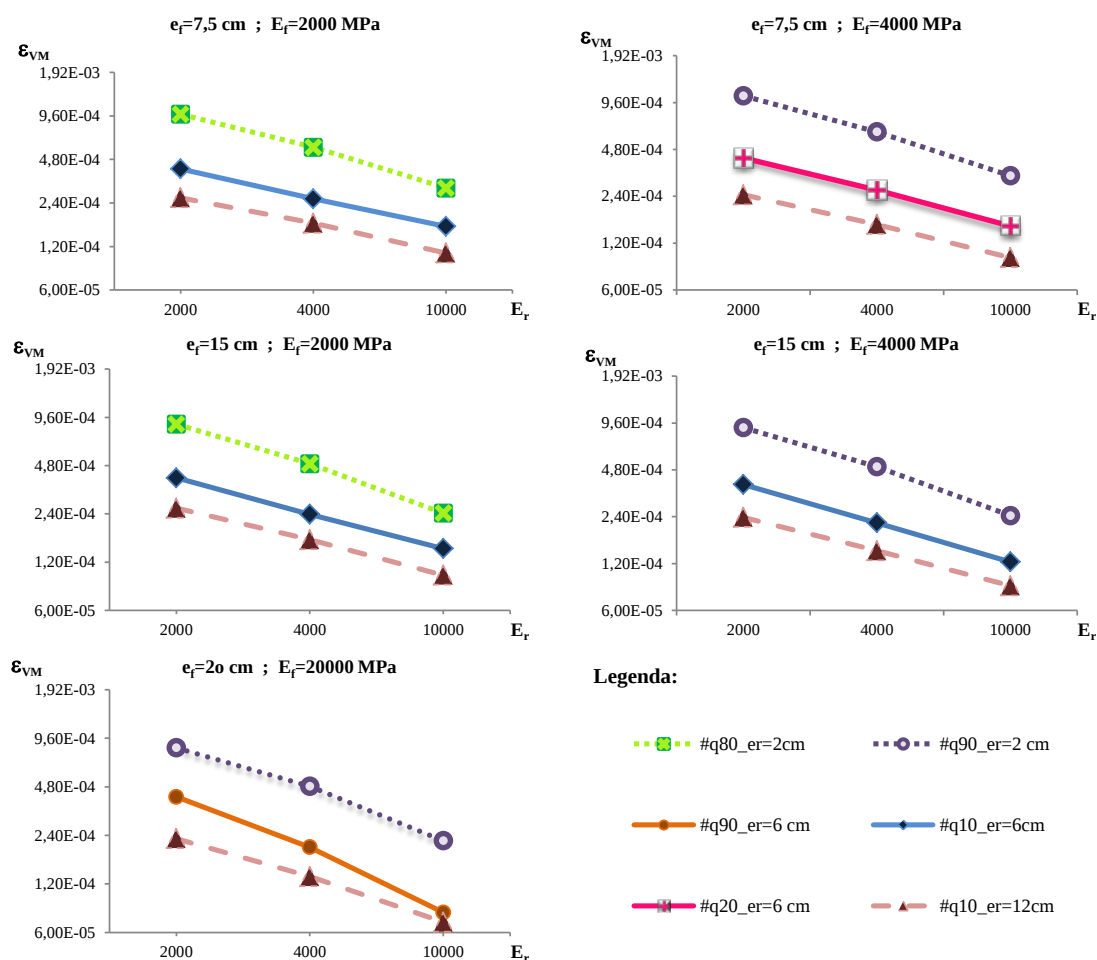


Figura 4.6 - Extensão de Von Mises dum reforço aplicado num pavimento fendilhado, sem SAMI, para diversas malhas de fendas

Verifica-se que independentemente do caso específico que se esteja a estudar, a BMB conduz sempre aos melhores resultados quando comparada à MC. Ou seja, a BMB é sempre a melhor mistura a utilizar na reabilitação do pavimento, quer se esteja a estudar apenas o que acontece na iminência do aparecimento da primeira fenda, quer quando apresenta uma outra malha de fendilhamento.

Nos pavimentos flexíveis existe quatro tipos de malhas de fendilhamento que condizem aos piores resultados, e estas são a malha de #10, #20, #80 e #90, o que se pode verificar nos gráficos do anexo II.

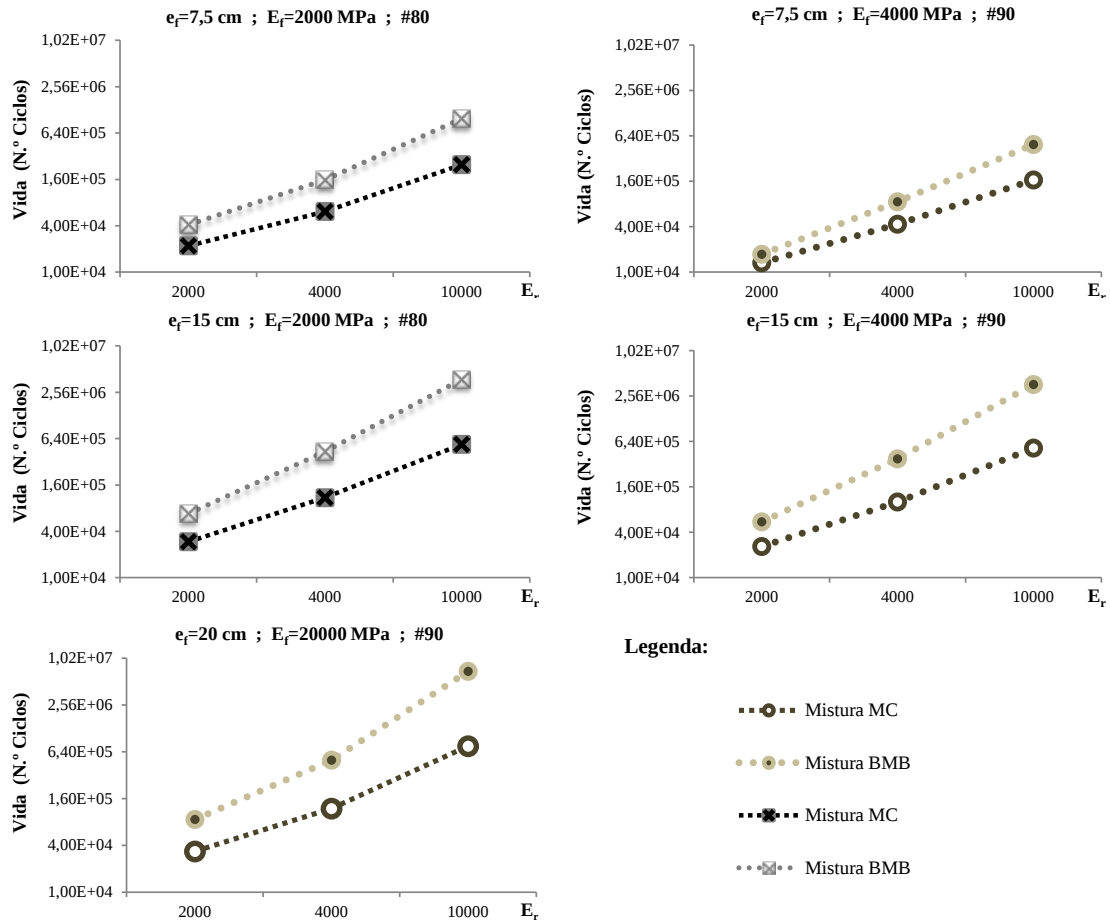


Figura 4.7 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 2 cm, aplicado num pavimento fendilhado com diversas malhas de fendas

O mesmo pavimento fendilhado, para diferentes espessuras de reforço, obtém diferentes tipos de malhas como resultados mais desfavoráveis. Nota-se que para as espessuras de 6 e 12 cm, a malha que conduz a estes resultados mais desfavoráveis vai de encontro ao espectável, ou seja, malhas # 10 e # 20, que são as malhas com quadrícula mais pequena, o que simboliza um pavimento muito fendilhado. Na espessura de 2 cm obtêm-se resultados antagónicos aos anteriores o que leva a conclusões diferentes e contrárias.

Nos pavimentos rígidos existe dois tipos de malhas de fendilhamento que condizem aos piores resultados, e estas são a malha de #10 para um reforço de 12 cm, e de #90 para as espessuras de 2 e 6 cm. Uma das ilações que se pode colher destas figuras relativamente aos 12 cm de reforço é que para espessuras maiores de reforço, os piores resultados de vida à reflexão de fendas serão obtidos para o caso dum reforço aplicado sobre uma

malha de fendas muito apertada, #10, já perto do estado de ruína do mesmo. Isto acontece quer nos pavimentos rígidos quer nos flexíveis.

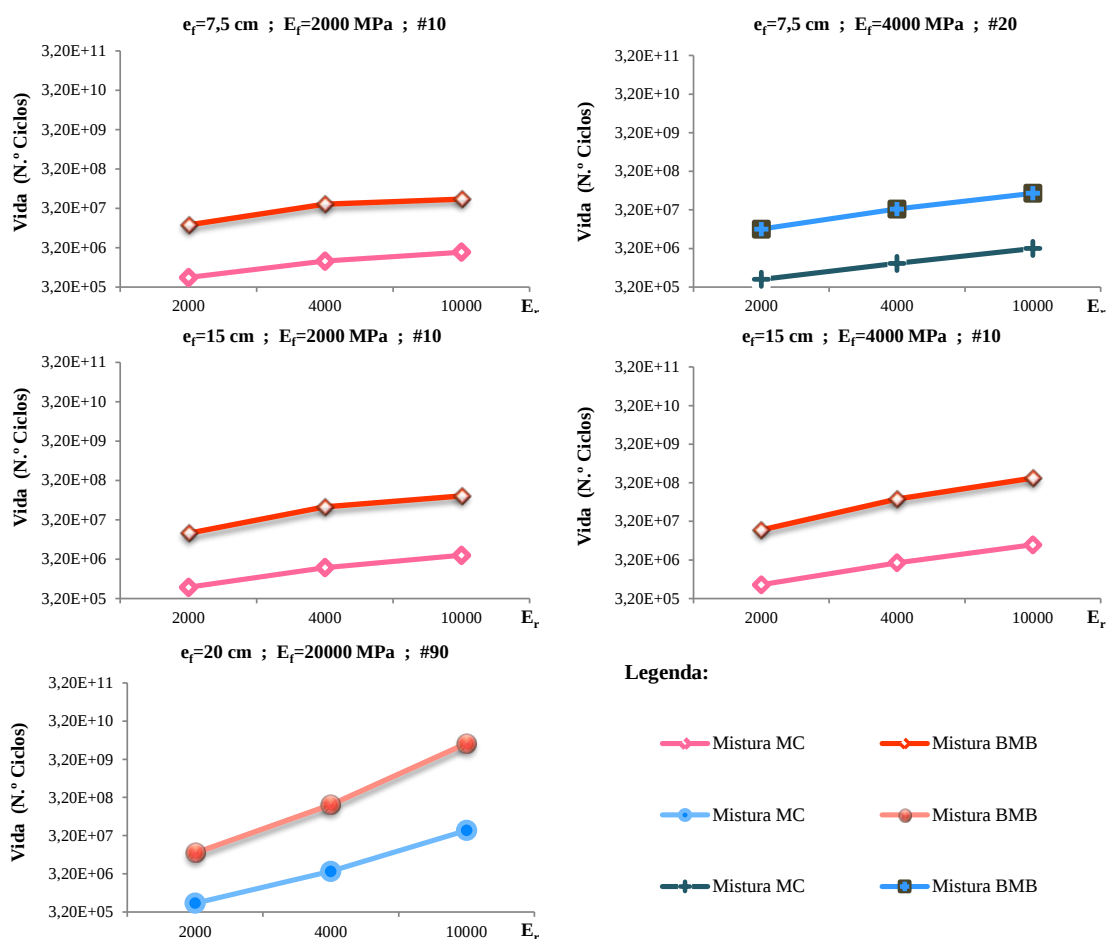


Figura 4.8 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 6 cm, aplicado num pavimento fendilhado

Apesar de estes serem os piores valores de vida à reflexão de fendas, quer dos pavimentos flexíveis quer dos rígidos, a vida previsível de BMB apresenta-se melhor do que da MC e este aspeto é mais acentuado para espessuras e módulos maiores.

Contata-se pelos gráficos que a malha de fendilhamento que provoca os piores resultados não é sempre a mesma e vai contra o espetável. Isto pode dever-se ao facto de que a metodologia utilizada não ser a mais adequada, por ter sido utilizado um valor médio das extensões de Von Mises. Impõe-se uma outra questão que envolve o próprio modelo numérico, que baseia-se no facto de as fendas serem modeladas com geometria regular. Tal facto não se constata na realidade, pois o fendilhamento que se observa nos pavimentos não apresenta uma forma regular.

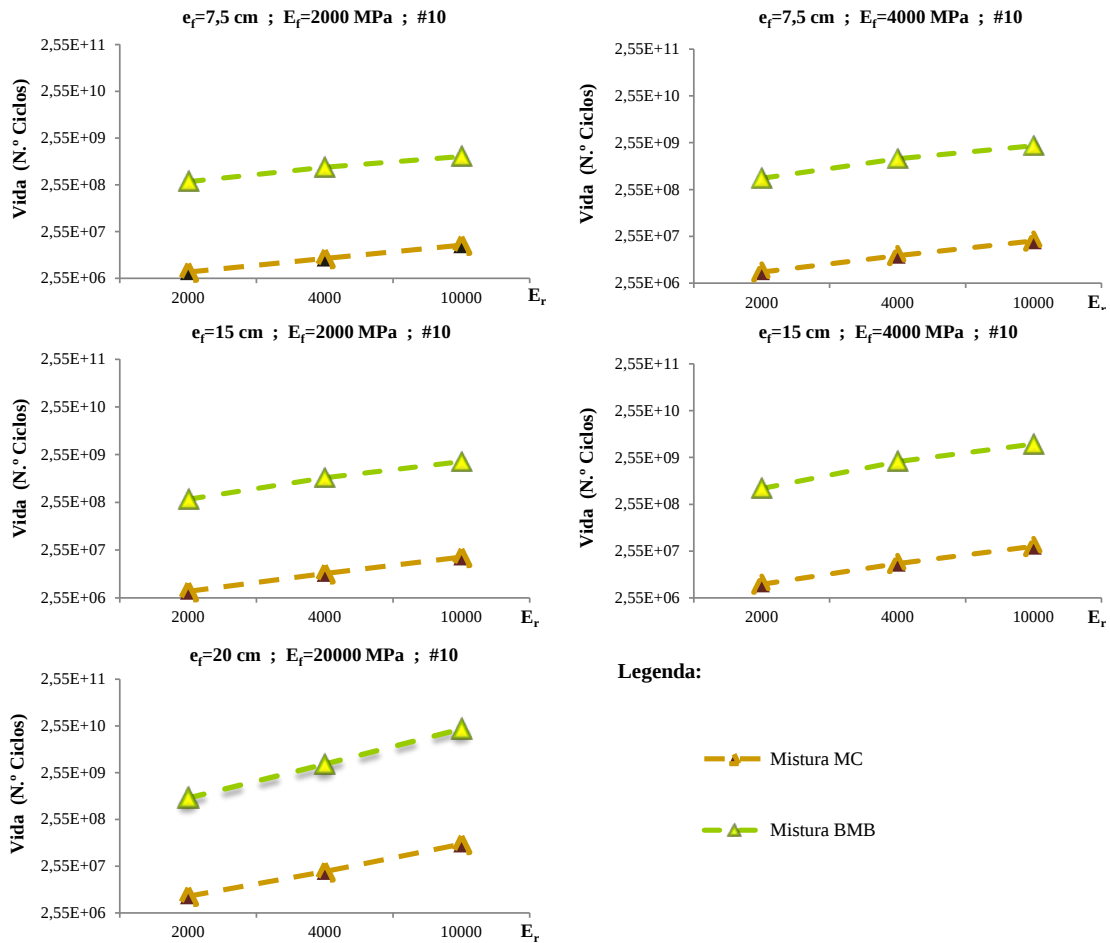


Figura 4.9 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 12 cm, aplicado num pavimento fendilhado com malha #10

4.2.2 Análise do reforço quanto à consideração de intercamadas

No presente subcapítulo analisa-se o comportamento do reforço numa perspetiva de influência da consideração, ou não, dum sistema do tipo SAMI. Recorre-se também ao uso das leis de fadiga para permitir uma melhor perceção quanto ao comportamento do reforço, e o que vai possibilitar também a comparação entre as misturas em estudo e a SAMI.

Os valores de extensões de Von Mises relativos aos resultados referentes às situações de sistemas de reforço com e sem SAMI, e que estão na base da avaliação da vida à reflexão de fendas, foram já apresentados na figura 4.1, na qual se expressa os resultados que envolvem a variação quer das espessuras do reforço como dos módulos e em função da camada fendilhada, obtidos apenas para uma fenda, em termos de vida à reflexão de fendas do reforço, para os quais foram obtidos previamente os valores das extensões.

Pelos valores ε_{VM} relativos a reforços de maior espessura (figura 4.1) as soluções com SAMI apresentam maiores valores de extensão do que as sem SAMI, levando a que os valores de vida previsível à reflexão de fendas dos casos considerados produzam os gráficos apresentados na figura 4.10, figura 4.11, figura 4.12 e figura 4.13.

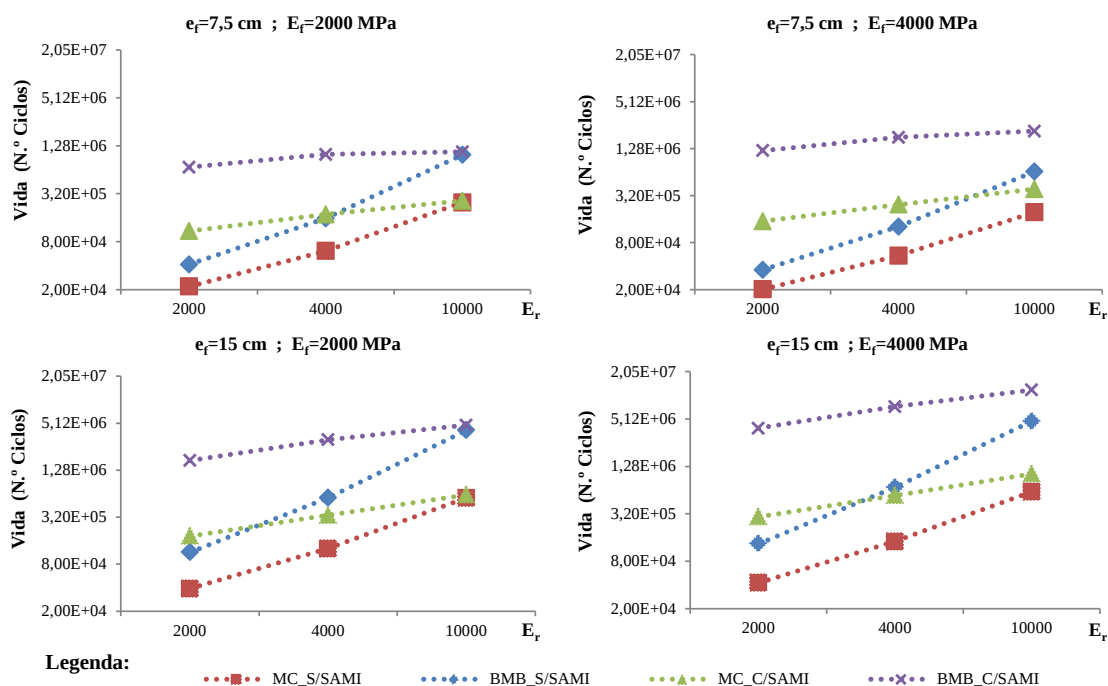


Figura 4.10 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 2 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado, com uma fenda

Relativamente aos gráficos da figura 4.10, verifica-se que as situações com SAMI conduzem a vida à reflexão de fendas melhores que as situações sem SAMI. Pela análise dos gráficos verifica-se que mesmo com SAMI, o reforço com BMB representa melhor desempenho do que as MC. Destes gráficos conclui-se ainda que para módulos altos de reforço das situações com SAMI e sem SAMI convergem.

Da figura 4.11 constata-se o contrário dos resultados obtidos anteriormente para 2 cm de reforço, ou seja, para 6 cm as soluções com SAMI e sem SAMI convergem para baixos módulos de reforço e divergem para módulos altos. Verifica-se que para esta espessura, ao contrário da de 2 cm, que as situações sem SAMI conduzem a melhores valores de vida à reflexão de fendas do que com SAMI. Mais uma vez, a BMB em comparação com a MC produz melhor desempenho para as situações sem SAMI.

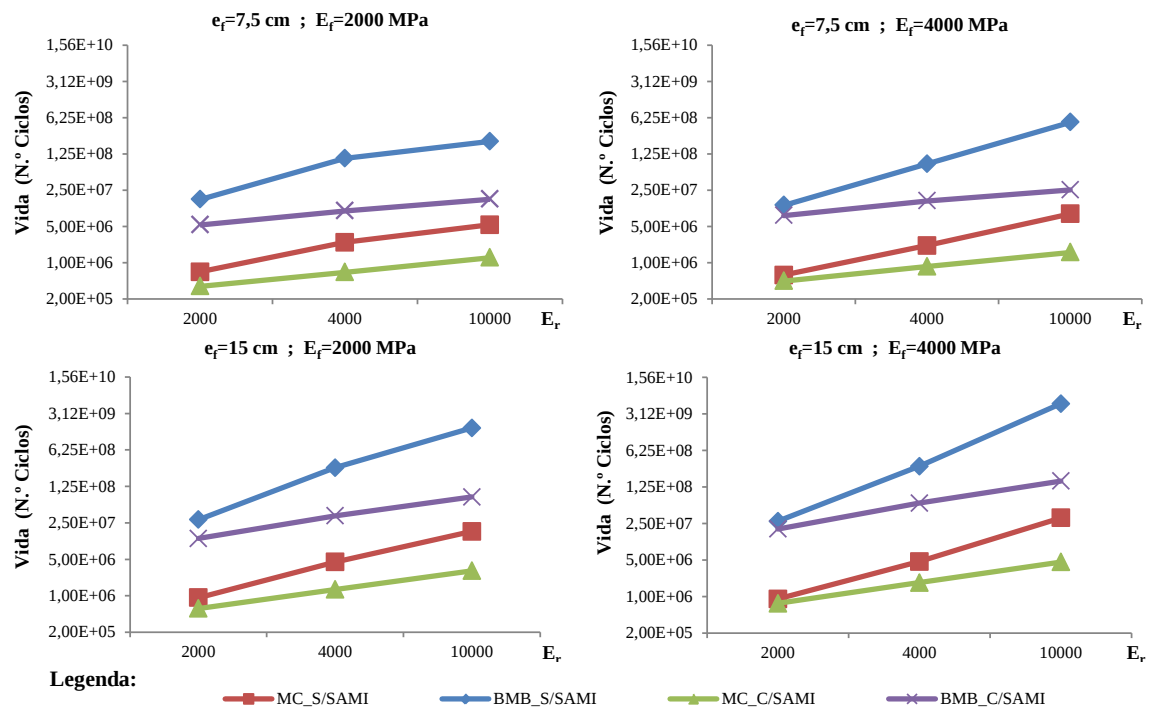


Figura 4.11 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 6 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado, com uma fenda

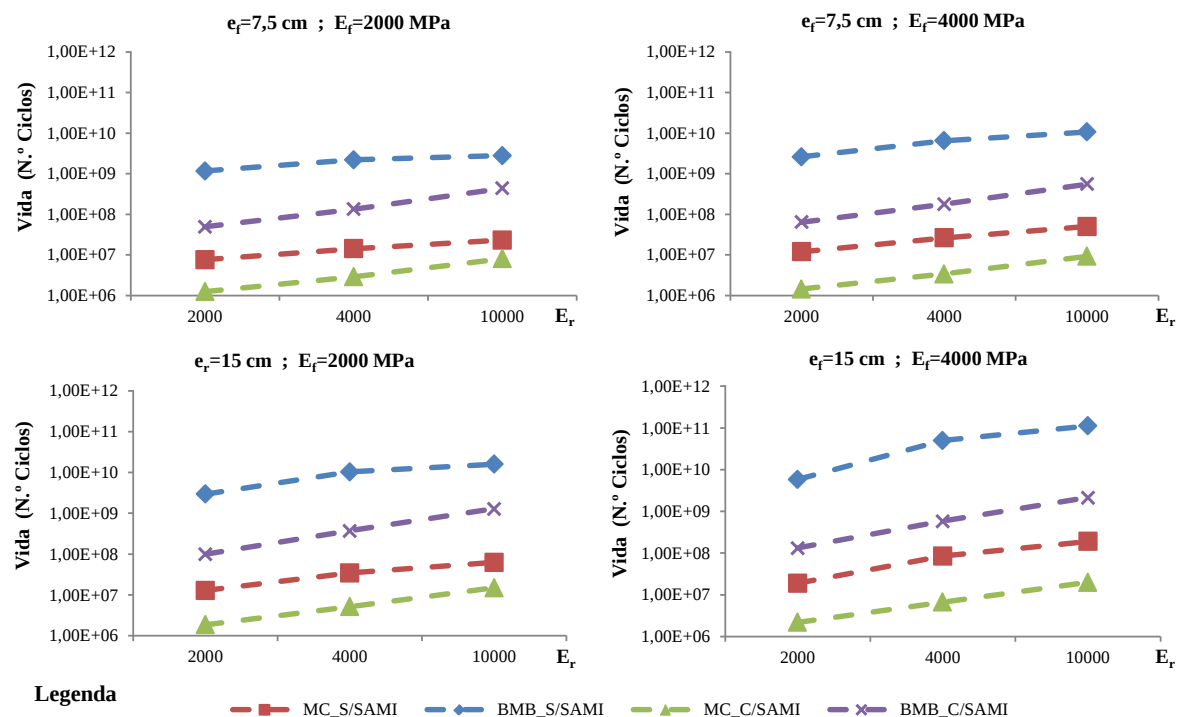


Figura 4.12 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 12 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado, com uma fenda

Relativamente aos resultados obtidos aquando da aplicação de uma maior espessura de reforço, figura 4.12, pode dizer-se que a BMB sem SAMI continua a desempenhar um melhor comportamento quando comparada com a MC e com a situação de não utilização de intercamadas. Quanto maior o módulo e a espessura do reforço, melhor é o seu o desempenho. Conclui-se também que maiores espessuras e módulo do pavimento fendilhado contribuem para melhorar a vida à reflexão de fendas do reforço.

A figura 4.13 representa as extensões de Von Mises para os reforços de 2, 6 e 12 cm quando aplicados a um pavimento rígido fendilhado.

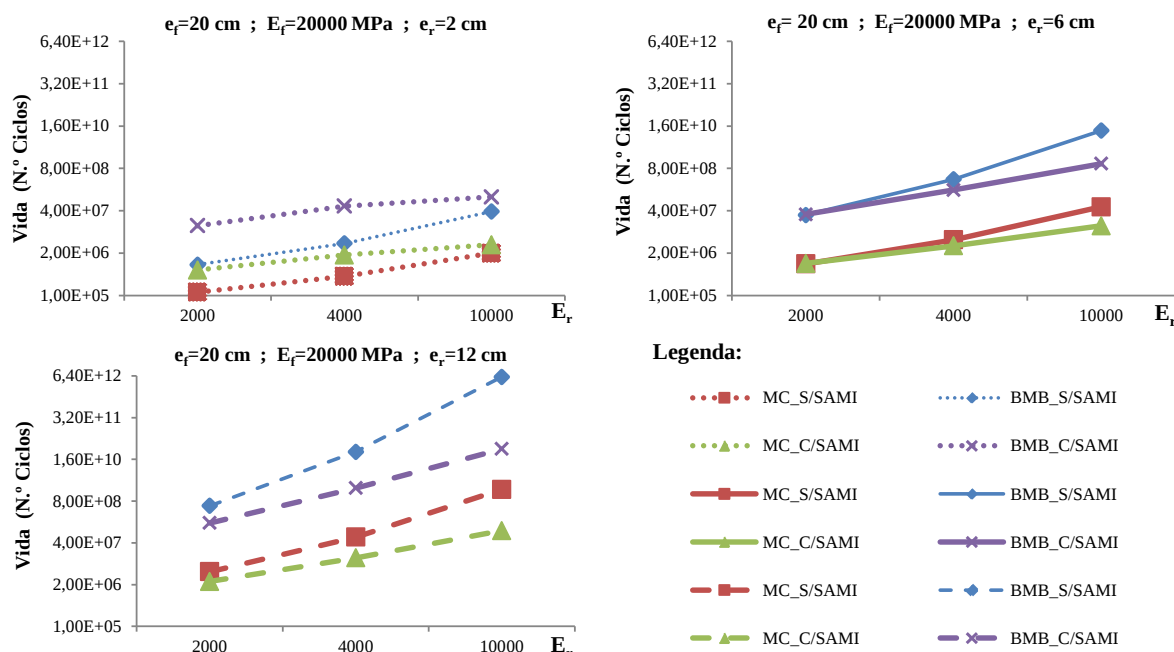


Figura 4.13 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço, aplicado num pavimento rígido fendilhado, com uma fenda;

A figura 4.13 representa a diferença de comportamento e a vida à reflexão de fendas do reforço sendo possível verificar-se as semelhanças de comportamento do reforço quando aplicado a situações com e sem SAMI. Para a espessura de 2 cm os valores da vida previsível, com e sem SAMI, convergem para módulos altos, enquanto para 6 cm os valores divergem para altos módulos e convergem para módulos baixos, sendo que, para esta espessura, a solução BMB sem SAMI é a que produz um melhor comportamento. Este aspeto pode indicar que as condições de aplicação do comportamento à fadiga subjacentes às leis adotadas neste estudo podem não ser as mais indicadas para a avaliação destes materiais quando sujeitos ao fenómeno de reflexão de fendas.

Neste subcapítulo, como no anterior, no sentido de alargar a análise do comportamento do reforço a condições de fendilhamento generalizado, são apresentados os gráficos de extensões de Von Mises que conduzem aos piores valores de vida à reflexão de fendas do reforço, quando aplicado em pavimentos flexíveis, por forma a comparar o efeito da utilização da SAMI.

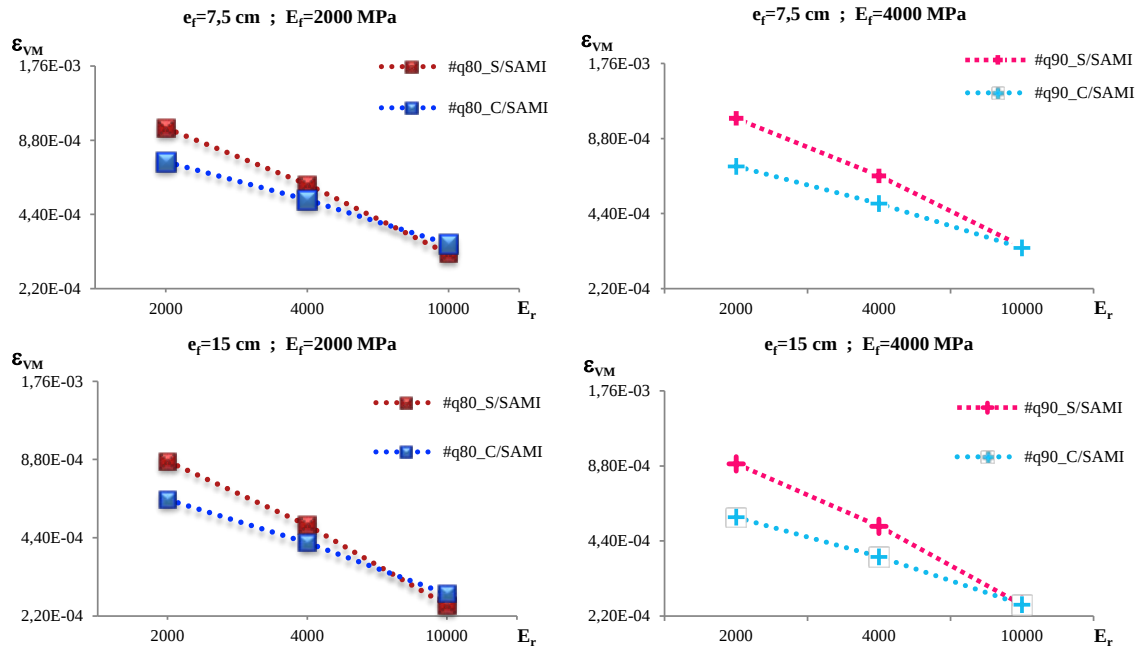


Figura 4.14 - Extensão de Von Mises dum reforço de 2 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado com malhas de fendas #80 e #90

Os gráficos da Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.16 representam o comportamento do reforço em termos de extensões de Von Mises dos pavimentos flexíveis fendilhados quando reabilitados por um reforço de 2, 6 e 12 cm respetivamente. Pela análise destes gráficos constata-se que os resultados para a espessura de 2 cm de reforço são diferentes quando comparados com os da espessura de 6 e 12 cm. Para um reforço com 2cm de espessura a solução sem SAMI apresenta maiores valores de ϵ_{VM} , do que a solução com SAMI. Para as espessuras de reforço de 6 e 12 cm, é possível constatar que a consideração de SAMI conduz a maiores valores de extensões, o que corresponde a baixos valores de vida à reflexão de fendas. Estes aspetos levam a pressupor que a SAMI só é vantajosa para 2 cm de espessura de reforço, o que contraria a perceção que se tem deste tipo de soluções, baseada na bibliografia consultada.

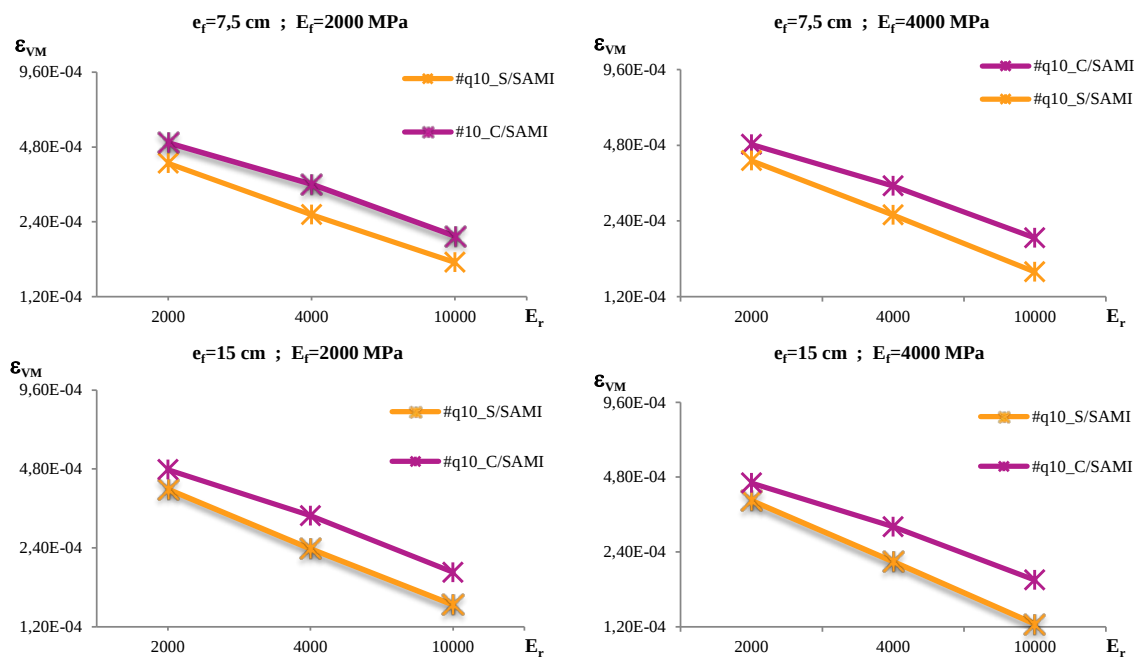


Figura 4.15 - Extensão de Von Mises dum reforço de 6 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado

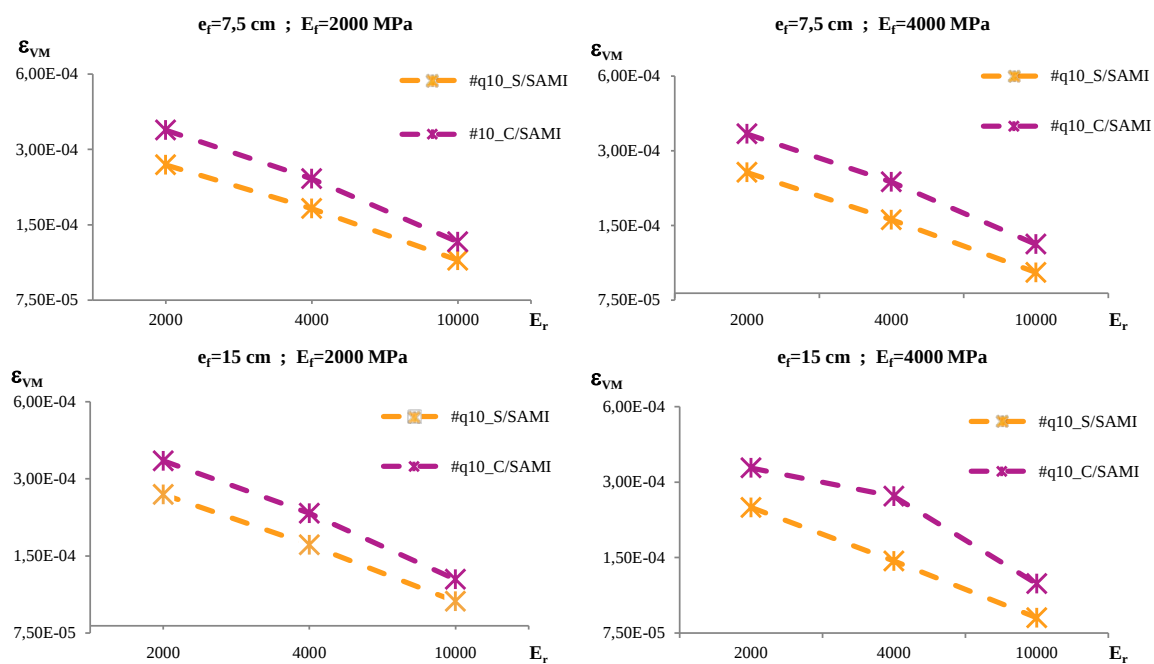


Figura 4.16 - Extensão de Von Mises dum reforço de 12 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado

Quando aplicadas as leis de fadiga adotadas neste trabalho às extensões obtidas nos gráficos anteriores, obtem-se a vida previsível do reforço. A Figura 4.17, Figura 4.18 e

Figura 4.19 mostram o comportamento do reforço de acordo com as mituas betuminosas utilizadas quando aplicado a pavimentos flexíveis.

Pela análise deste e dos gráficos seguintes é possível concluir que as soluções de reabilitação com BMB conduzem a valores de vida superiores às soluções com MC.

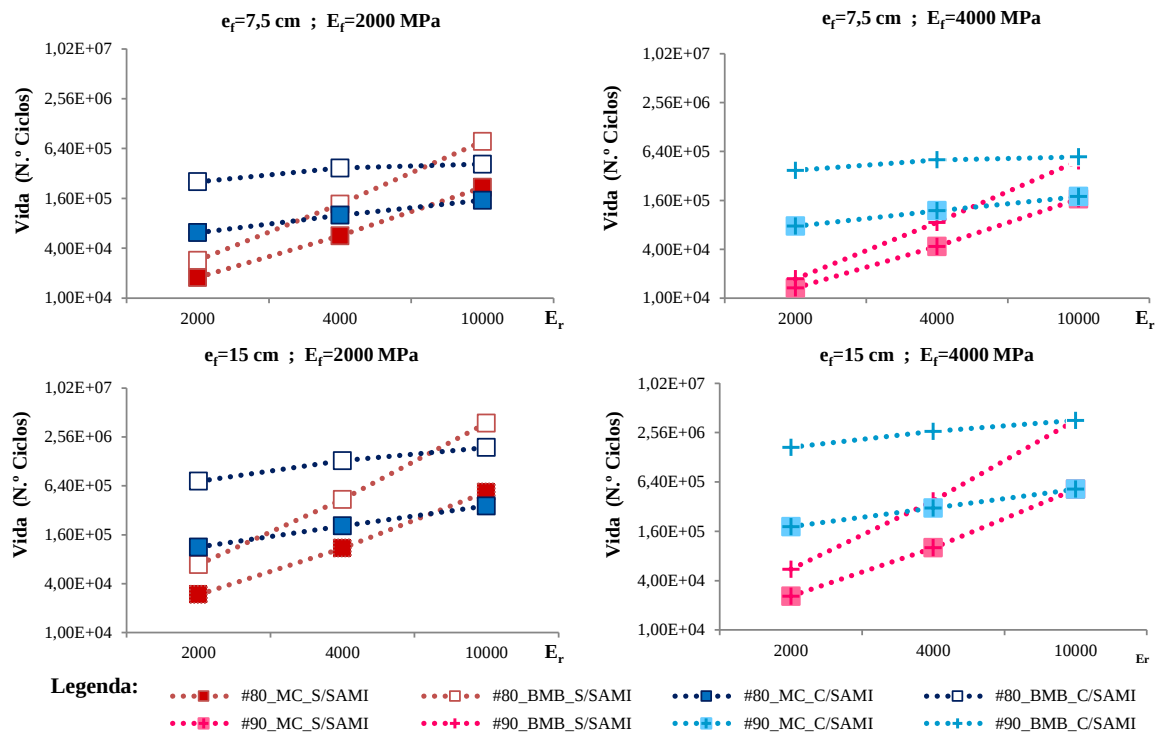


Figura 4.17 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 2 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado

4.3 Análise do reforço quanto ao nível de fendilhamento

De modo a poder-se comparar o comportamento do reforço quando analisado perante diferentes níveis de fendilhado, foram elaborados gráficos onde essa comparação é possível de se observar.

Nestes gráficos são apresentadas em função das três espessuras do reforço bem com dos três módulos de deformabilidade para as características dos pavimentos em estudo. Os gráficos representam a comparação entre uma fenda e os restantes níveis de fendilhamento, correspondentes às malhas quadradas de #10, #20, #30, #40, #50, #60, #70, #80 e #90. Cada figura representa um único pavimento fendilhado sobre o qual se aplicam as várias espessuras de reforço, 2, 6 e 12 cm, podendo-se assim comparar os valores de ϵ_{VM} obtidos.

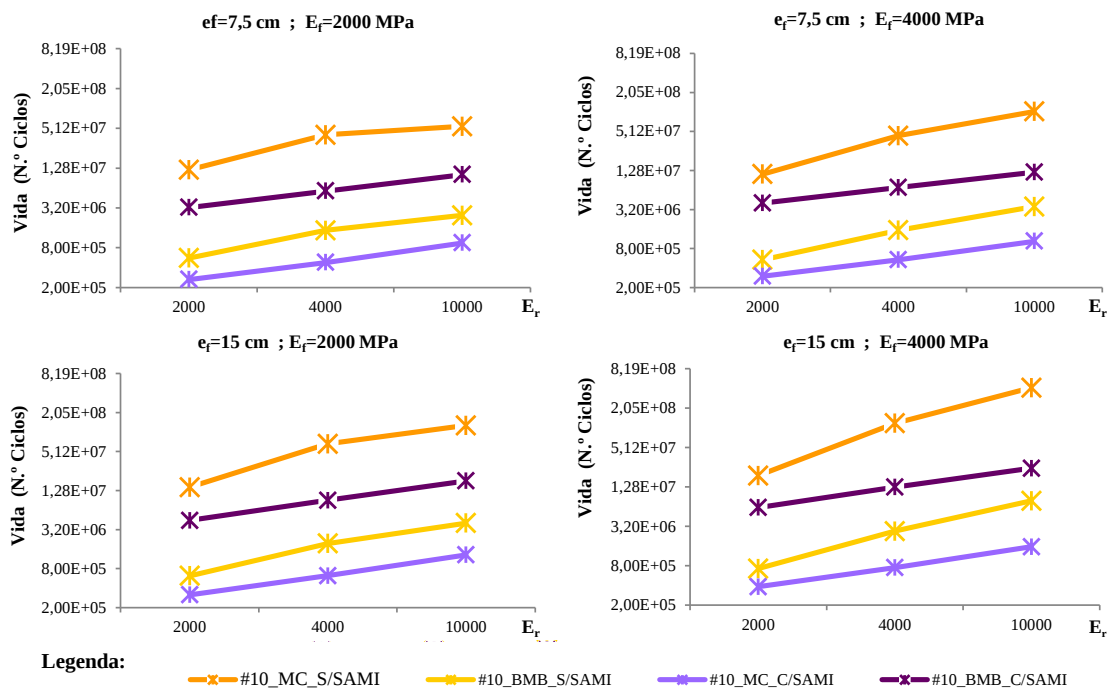


Figura 4.18 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 6 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado

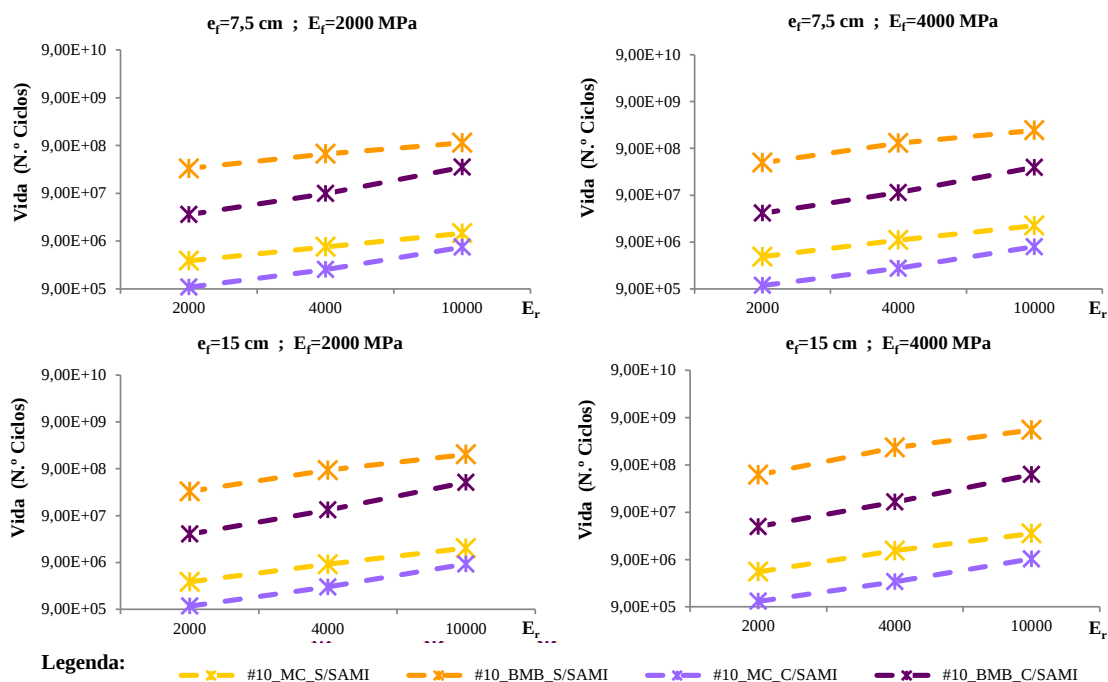


Figura 4.19 - Vida à Fadiga (ciclos) dum reforço com 12 cm, aplicado num pavimento flexível fendilhado

Pela análise dos gráficos referentes aos pavimentos flexíveis fendilhados constata-se que os valores dos demais níveis de fendilhamento convergem para os resultados de

uma fenda para a espessura de 2 e 6 cm, esta com algumas exceções, ou seja, alguns níveis de fendilhamento obtém valores de ε_{VM} superiores aos de uma fenda.

Em primeiro lugar estabelece-se que o modelo deteta para a maioria dos casos, a presença de fendilhamento diferenciado.

Constata-se que nestes gráficos que uma há discrepância de valores entre uma fenda e a malha de fendilhamento de #10, acentuando-se para módulos de reforço mais altos.

No caso da Figura 4.24, os valores entre uma fenda e os restantes níveis de fendilhamento não convergem. Para o pavimento rígido, a solução com menores valores de ε_{VM} continua a ser para uma fenda. Constata-se também que entre os pavimentos fendilhados aqui estudados, é no rígido, representado pela figura 4.24, onde se verificam maiores diferenças entre o fendilhamento representado por uma fenda e os restantes níveis de fendilhamento. Nota-se também que em todos os pavimentos fendilhados, é na espessura de 12 cm de reforço que se verificam maiores discrepâncias entre uma fenda e os restantes níveis de fendilhamento. Relativamente às outras espessuras, 2 e 6 cm, constata-se maior proximidade de valores de extensão de Von Mises.

Pela análise dos gráficos verifica-se que entre dois pavimentos fendilhados que apresentam a mesma espessura mas módulos diferentes, os valores de ε_{VM} são praticamente idênticos nas espessuras de 2 e 6 cm, diferenciando-se na espessura de 12 cm. Quando se compara pavimentos fendilhados com espessuras diferentes mas módulos iguais, as diferenças são maiores, sendo que as maiores espessuras do pavimento fendilhado apresentam valores mais baixos de ε_{VM} .

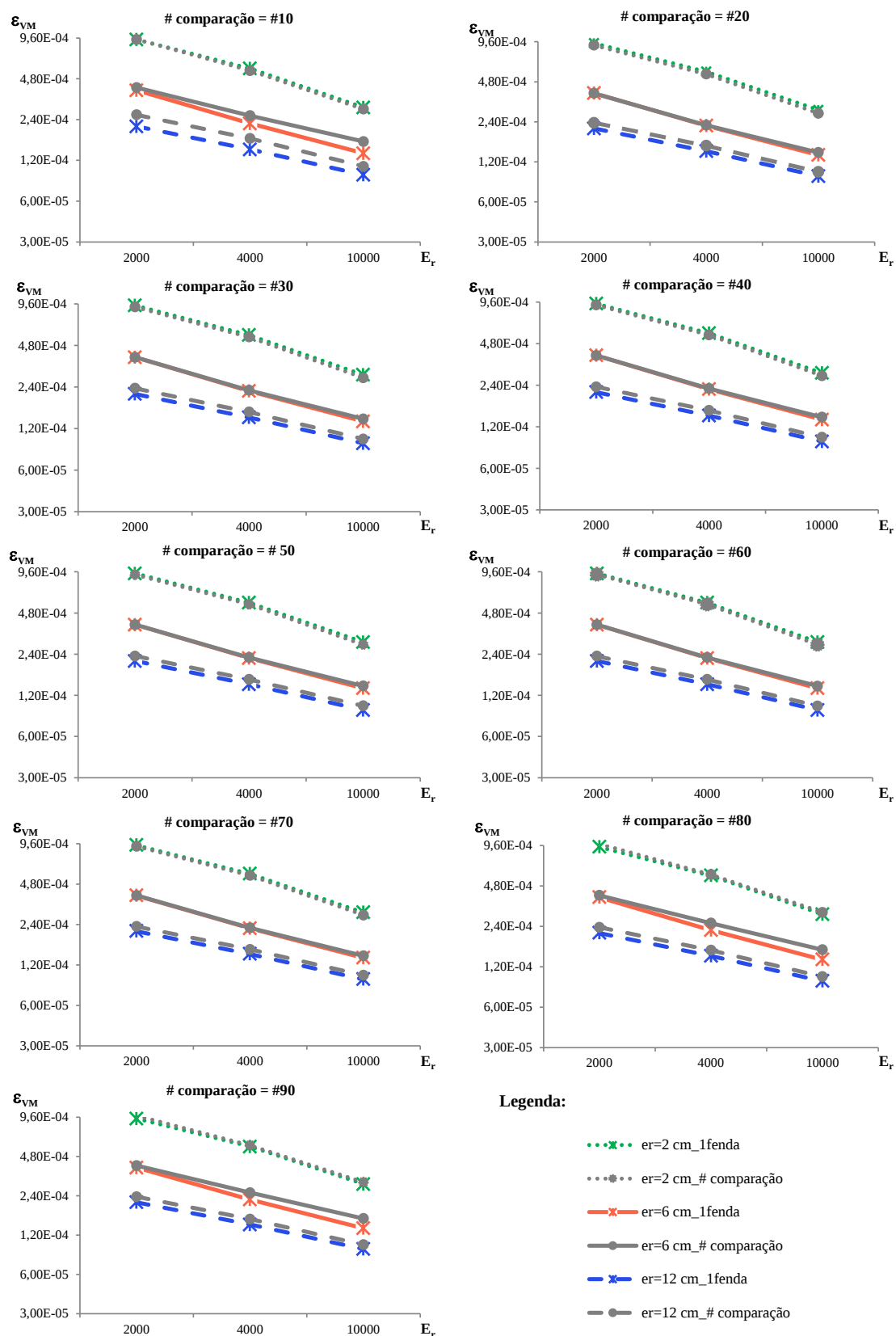


Figura 4.20 – Comparação de extensões de Von Mises dum reforço, aplicado num pavimento flexível fendilhado de 7, 5 cm e 2000 MPa de módulo, em diferentes níveis de fendilhamento

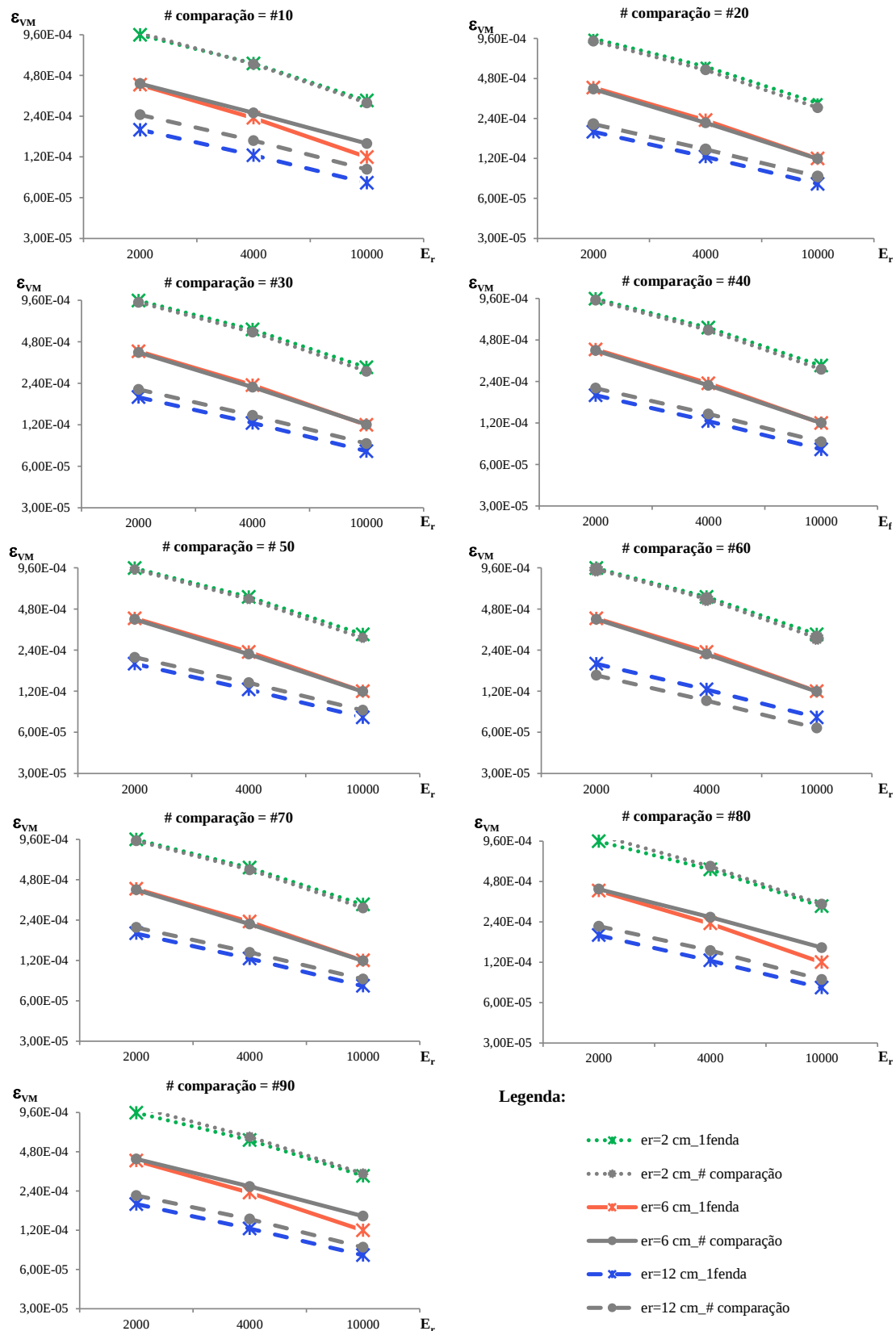


Figura 4.21 - Comparação de extensões de Von Mises dum reforço, aplicado num pavimento flexível fendilhado de 7, 5 cm e 4000 MPa de módulo, em diferentes níveis de fendilhamento

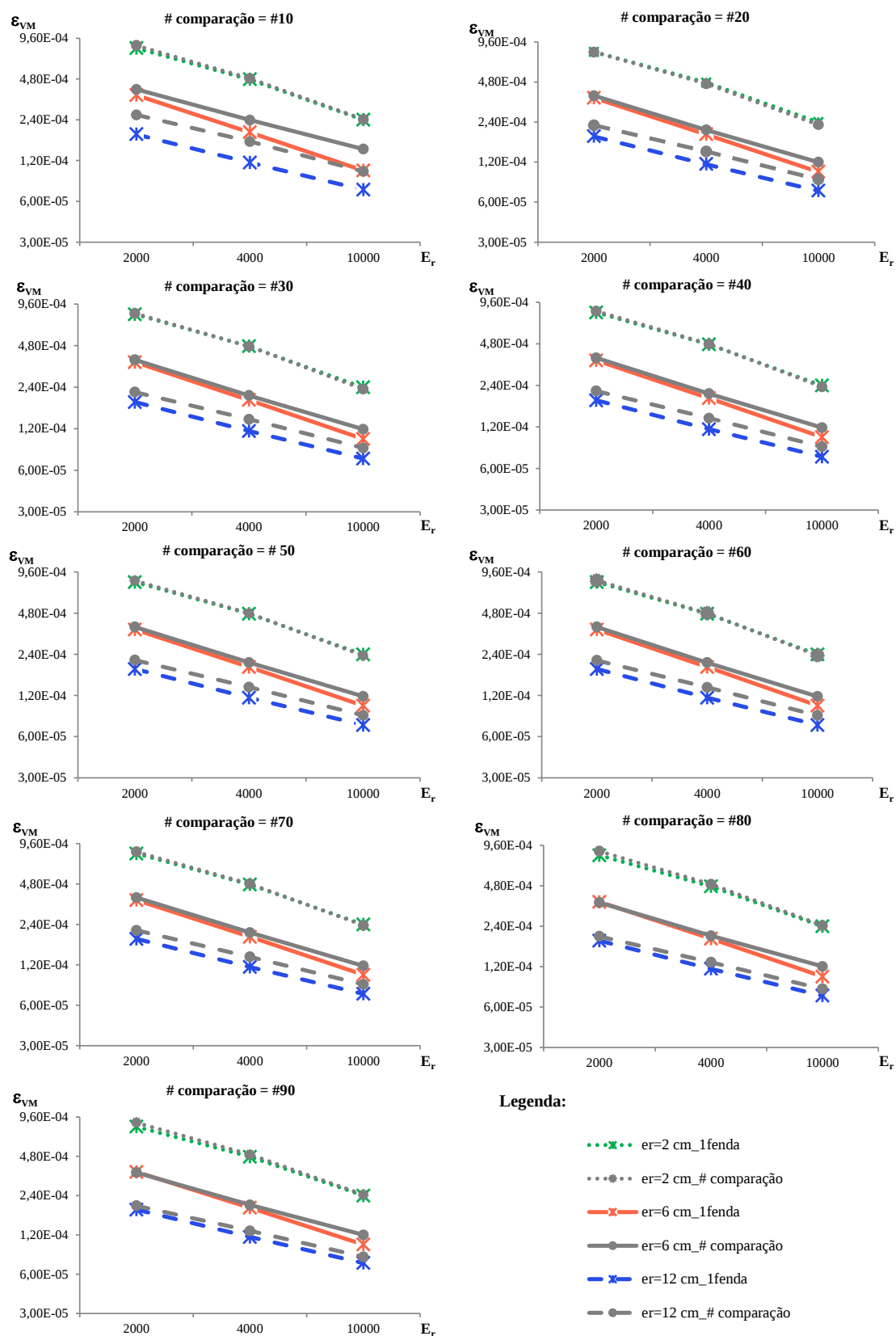


Figura 4.22 -- Comparação de extensões de Von Mises dum reforço, aplicado num pavimento flexível fendilhado de 15 cm e 2000 MPa de módulo, em diferentes níveis de fendilhamento

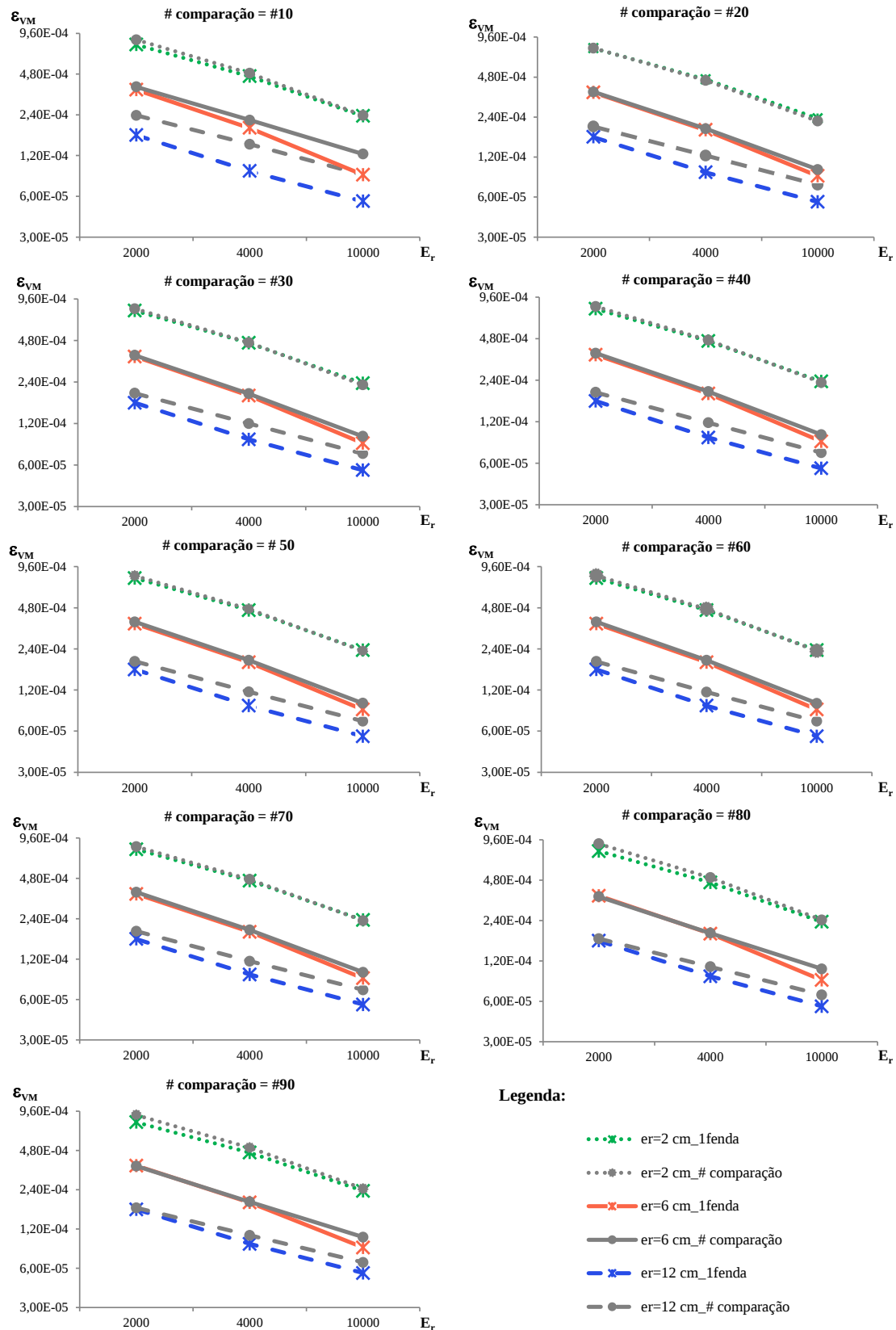


Figura 4.23 - Comparação de extensões de Von Mises dum reforço, aplicado num pavimento flexível fendilhado de 15 cm e 4000 MPa de módulo, em diferentes níveis de fendilhamento

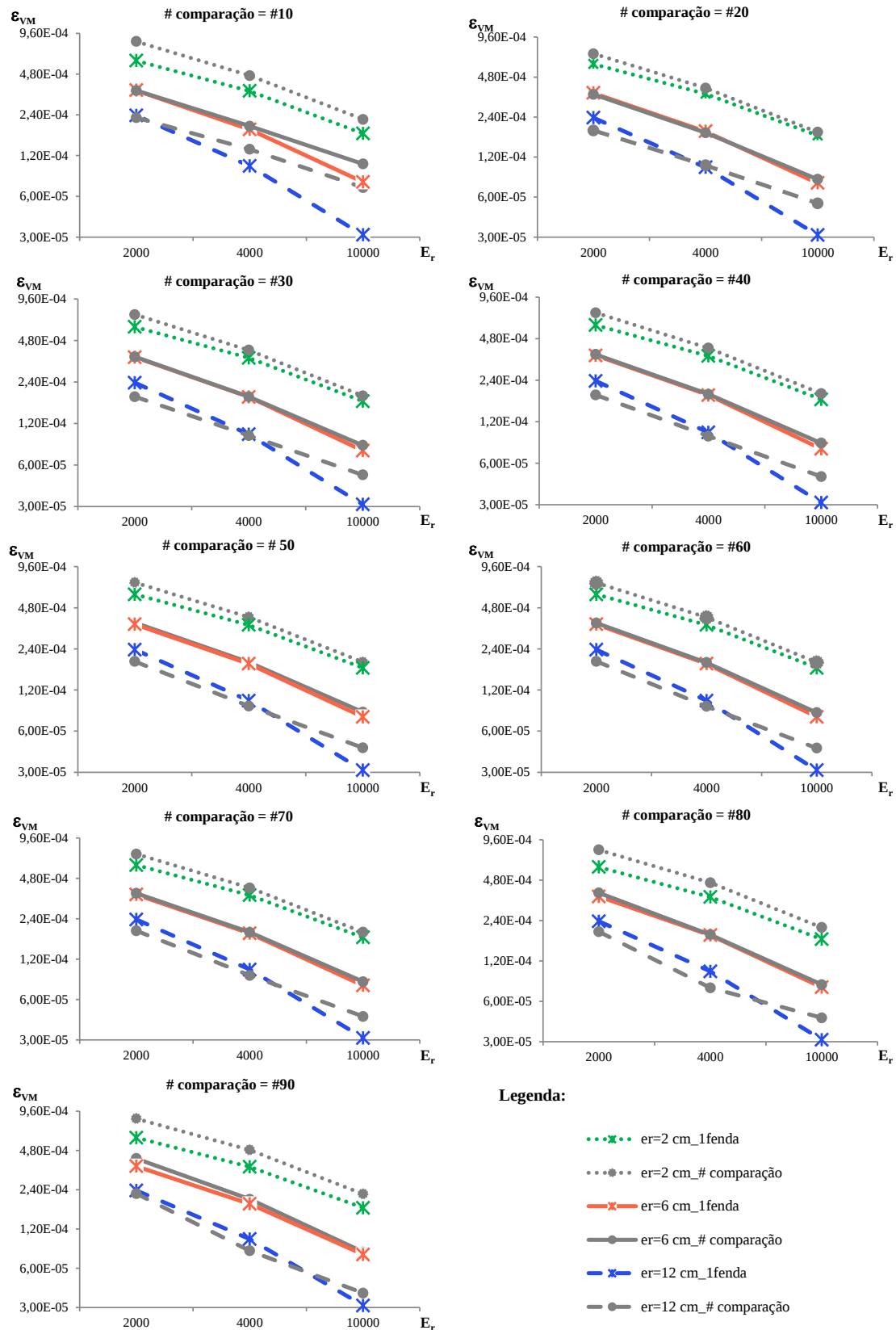


Figura 4.24 - Comparação de extensões de Von Mises dum reforço, aplicado num pavimento rígido fendilhado de 20 cm e 20000 MPa de módulo, em diferentes níveis de fendilhamento

5 Considerações finais

O presente trabalho de projeto teve como objetivo averiguar da pertinência da modelação do comportamento de reforços de pavimento através de modelos numéricos desenvolvidos com base na metodologia dos elementos finitos, bem como da sua capacidade de contemplar um maior número possível de aspetos fundamentais no comportamento daquelas estruturas de pavimento. A modelação numérica objetivou o comportamento de reforços de pavimento à reflexão de fendas de forma a simular um conjunto de situações de análise, considerando como ação fundamental a do tráfego, considerando dois tipos de misturas betuminosas, usando ou não intercamadas, aplicados sobre pavimentos fendilhados com a possibilidade de simulação de diversos níveis de fendilhamento.

Do processo de simulação com base no uso do modelo mecânico adotado foram tratados os resultados de forma a explicitá-los em termos de extensões de Von Mises média determinada na zona acima da fenda principal, e em termos de previsão da vida à reflexão de fendas do reforço de pavimento.

Da análise destes resultados conclui-se que, na maioria dos casos, os resultados do processamento do modelo associados à metodologia de consideração do critério de ruína à reflexão de fendas foi de encontro ao que se expectava, levando a concluir da pertinência do uso deste tipo de modelos na análise dos mecanismos considerados. No entanto, constatou-se também existirem algumas situações de simulação cujos resultados requerem o desenvolvimento de alguma reflexão futura sobre a melhoria da modelação do fenómeno, concretamente quando se considera a existência de intercamadas, uma vez que, com base nos resultados, a reabilitação através da colocação de SAMI só é eficaz para espessuras de reforços reduzidas com módulos de deformabilidade reduzidos.

Neste contexto específico é perceptível alguma fragilidade do modelo questionando-se se a representação do comportamento à reflexão de fendas através duma extensão de Von Mises média constitui o procedimento mais adequado, devendo-se optar por outra abordagem, do tipo da adotada em Shatnawi et al. (2011), na qual são consideradas extensões apenas de determinados nós acima da fenda e não em todos.

Considera-se ainda pertinente um esforço de adequação de leis de fadiga a este tipo de análises julgando-se ser conveniente o estudo de ensaios adequados a este tipo de fenómeno - ensaio de flexão em 4 pontos.

Na perspetiva na inclusão do multifendilhamento no modelo numérico constata-se que este modelo apresenta um comportamento sensível à configuração de diversas malhas de fendilhamento. No entanto considera-se a necessidade de verificar a convergência do modelo usado com outros modelos que incluam multifendilhamento e/ou com dados experimentais, ou de campo, do comportamento de reforços de pavimento sob diversas condições de fendilhamento.

Da análise dos resultados constata-se também que, na generalidade das situações simuladas, o reforço de pavimento quando constituído por mistura betuminosa com betume modificado com borracha, BMB, exhibe uma vida previsível do reforço, em termos de reflexão de fendas, superior à associada às situações de reforço constituído por uma mistura betuminosa convencional, MC, qualquer que seja o nível de fendilhamento estudado. Depreende-se que esta ocorrência se possa dever às suas propriedades de boa flexibilidade e boa resistência à fadiga das misturas betuminosa com betume modificado com borracha, BMB.

Das espessuras de reforço consideradas, a que melhores resultados proporciona é a espessura de 12 cm de reforço. Quando aliada ao módulo de deformabilidade mais elevado conduz à melhor solução de reforço, com maior vida à reflexão de fendas do reforço, o que implica um maior período de vida útil para aquele pavimento fendilhado reabilitado. Conclui-se que quanto maior a espessura que for utilizada, maiores e melhores serão os resultados obtidos. No entanto uma espessura muito elevada de reforço deixa de ser viável economicamente.

Relativamente aos vários níveis de fendilhamento estudados, é possível concluir que a malha que conduz mais frequentemente a piores resultados é a malha de fendilhamento com 10 cm de largura, dos níveis de fendilhamento estudados com maior gravidade.

Do trabalho realizado conclui-se ainda da necessidade de desenvolvimento de trabalho futuro versando aspetos que envolvam o melhoramento do modelo usado, incluindo modelação ao nível da mecânica da fratura usando um modelo de “zona coesiva” tendo em vista a obtenção de tensões/extensões mais adequadas a este fenómeno, a inclusão

duma maior gama de casos de estudo, concretamente variando aspetos relacionados com as camadas granulares e do solo de fundação, e a inclusão doutros tipos de materiais betuminosos e de intercamadas.

Referências Bibliográficas

- Abd el Halim, A. O., & Razaqpur, A. G. (1993). Minimization of reflection cracking through the use of geogrid and better compaction. *Reflective Cracking in Pavements: State of the art and Design Recommendations. Proceedings of the 2nd International Rilem Conference*. Liege, Belgium.
- Allen, D. H., & Haisler, W. E. (1985). Introduction to aerospace structural analysis. New York, John Wiley.
- ANSYS®. (s.d.). Academic Teaching Introductory, Release 14.0. *Help System, SOLID185, ANSYS, Inc.*
- ANSYS®. (s.d.). Academic Teaching Introductory, Release 14.0. *Help System, SOLID186, ANSYS, Inc.*
- Antunes, M., Batista, F., Fontul, S., & Domingos, P. (2005). Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviário. *Apontamentos do curso de formação promovido pelo Fundec - LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil*. Lisboa.
- Azevedo, M. d. (2001). Influência das Características dos Pavimentos na Segurança. 1.º Congresso de Segurança Rodoviária em Meio Urbano, Laboratório de Engenharia Civil. Lisboa.
- Batista, F. A. (2004). Misturas Betuminosas Densas a Frio. *Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*. Porto.
- Branco, F., Paulo, F., & Santos, L. P. (2008). *Pavimentos Rodoviários*. Almedina.
- Claussen, A. I., Edwards, J. M., Sommer, P., & Ugé, P. (1977). Asphalt Pavement Design. The Shell Method. *Proceedings, Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. Ann Arbor. Vol. I. pp 39-74.
- Colombier, G. (1989). Fissuration des Chaussées, Nature et Origine des Fissures, Moyens pour Maîtriser leur Remontée. *Proceedings of the First International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements*.

- Company, S. -C. (2005). Grelhas "Pré-betuminadas" para Reforço de Pavimentos Asfálticos. *Curso - Conservação de Estradas: Noções Gerais e Controlo de Qualidade de Obra, EP - Estradas de Portugal, E.P.E.* Almada.
- Costa, R. (2001). Conhecer os Betumes Modificados. *Coordenação Técnica de Betumes - Petrolgal, S.A. - Galp Energia.*
- de Bondt, A. (1995). Superposition of the individual effect of traffic and environmental loads on reflective cracking process in asphalt concrete overlays. *Report 7-95-203-20. Road and Railroad Research Laboratory. Delft University of Technology.* Delft, The Netherlands.
- Jacinto, M. (2003). Caracterização Estrutural de Pavimentos. *Dissertação para Obtenção de Mestre em Vias de Comunicação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.* Porto.
- Jacinto, M. A. (s.d.). *Reforço de Pavimentos Flexíveis.* Obtido de Engenharia Civil na Internet: <http://www.engenhariacivil.com/>
- Lopes, Ó. M. (Junho de 2009). Misturas Betuminosas - Determinação das Características para o Cálculo dos Pavimentos. *Dissertação Mestrado - Especialização em Vias de Comunicação, FEUP.*
- Marchand, J. P., & Goacolou, H. (23-26 de Agosto de 1982). Cracking in Wearing Courses. *University of Michigan - Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements.* Held at Delft University of Technology, The Netherlands.
- Minhoto, M. J. (Agosto de 2005). Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis. *Tese de Doutoramento.* Universidade do Minho.
- Pais, J. C. (Maio de 1999). Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis. Universidade do Minho.
- Pais, J., Minhoto, M., & Shatnawi, S. (20-22 de Junho de 2012). "Multi-cracks modeling in reflective cracking". *7th International RILEM Conference on Cracking in Asphaltic Pavements.* Delft, The Netherlands.

- Pereira, P. A., & Miranda, V. (Novembro 1999). Os Métodos e Programas de Apoio à Gestão dos Pavimentos da Rede Rodoviária Nacional. In C. R. Português, *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*.
- Pereira, P. A., Pais, J. C., Freitas, E. F., Silva, H. M., & Oliveira, J. R. (2007). A Reabilitação da rede rodoviária no século XXI. [7] *Paulo António Alves Pereira, Gestão da conservação dos pavimentos rodoviários, Análise de sistemas de gestão existentes*. Azurém - Guimarães, Portugal.
- Pereira, P., & Miranda, C. (1999). Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários. Universidade do Minho, Braga.
- Portugal, E. d. (Fevereiro de 2009). 14.01 - Terraplenagem - Características dos Materiais. *Caderno de Encargos Tipo Obra*.
- Recipav. (2004). A utilização do Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus em Portugal. Cartaxo.
- Sabaté, J. (2008). *Manual de Metodologia e Boas Práticas para a Elaboração de um Plano de Mobilidade Sustentável*. Impressão digital na Tipografia Belgráfica, Moita.
- Santos, M. J. (2009). Dimensionamento de camadas de reforço de pavimentos rodoviários flexíveis. *Universidade de Aveiro - Departamento de Engenharia Civil*.
- Shatnawi, S., Pais, J., & Minhoto, M. (2011). Asphalt rubber interlayer benefits on reflective crack retardation of flexible pavement overlays. In *Southern African Transport Conference*. Pretoria, South Africa.
- Silva, H. M. (2005). Caracterização do mastic betuminoso e da ligação agregado-mastique : contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas. *Teses de Doutoramento - Universidade do Minho*.
- Sousa, J. B., Pais, J. C., Saim, R., Way, G., & Stubstad, R. N. (2002). Development of a Mechanistic-Empirical Based Overlay Design Method for Reflective Cracking. *Journal of the Transportation Research Board*. Washington D.C., USA.
- Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). Principles of pavement design.

Anexos

Anexo I – Quadro de valores das extensões de cada uma das análises efetuada

Anexo II – Representação gráfica dos valores de vida à reflexão de fendas de um pavimento de acordo com o nível de fendilhamento

Anexo I

Fenda	Ext. Sit.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	ε_{VM}	9,35E-04	3,94E-04	2,14E-04	5,71E-04	2,24E-04	1,44E-04	2,95E-04	1,35E-04	9,37E-05	6,24E-04	4,64E-04	3,37E-04	4,38E-04	3,14E-04	2,16E-04	2,91E-04	1,96E-04	1,22E-04
	ε_t	6,93E-04	2,92E-04	1,58E-04	4,23E-04	1,66E-04	1,07E-04	2,18E-04	1,00E-04	6,94E-05	4,62E-04	3,44E-04	2,50E-04	3,24E-04	2,33E-04	1,60E-04	2,15E-04	1,45E-04	9,06E-05
q10	ε_{VM}	9,35E-04	4,13E-04	2,60E-04	5,51E-04	2,56E-04	1,74E-04	2,86E-04	1,65E-04	1,08E-04	6,92E-04	4,99E-04	3,58E-04	4,84E-04	3,40E-04	2,29E-04	3,30E-04	2,10E-04	1,28E-04
	ε_t	6,93E-04	3,06E-04	1,93E-04	4,08E-04	1,90E-04	1,29E-04	2,12E-04	1,22E-04	8,01E-05	5,13E-04	3,70E-04	2,65E-04	3,59E-04	2,52E-04	1,70E-04	2,44E-04	1,56E-04	9,50E-05
q20i	ε_{VM}	9,04E-04	3,93E-04	2,36E-04	5,48E-04	2,26E-04	1,59E-04	2,78E-04	1,41E-04	1,01E-04	6,21E-04	4,84E-04	3,52E-04	4,29E-04	3,29E-04	2,24E-04	2,92E-04	2,04E-04	1,26E-04
	ε_t	6,70E-04	2,91E-04	1,75E-04	4,06E-04	1,68E-04	1,18E-04	2,06E-04	1,04E-04	7,49E-05	4,60E-04	3,58E-04	2,61E-04	3,18E-04	2,44E-04	1,66E-04	2,16E-04	1,51E-04	9,32E-05
q20p	ε_{VM}	9,67E-04	4,11E-04	2,42E-04	5,72E-04	2,55E-04	1,62E-04	3,01E-04	1,61E-04	1,02E-04	7,27E-04	4,77E-04	3,41E-04	5,04E-04	3,25E-04	2,20E-04	3,32E-04	2,02E-04	1,25E-04
	ε_t	7,16E-04	3,04E-04	1,79E-04	4,24E-04	1,89E-04	1,20E-04	2,23E-04	1,20E-04	7,56E-05	5,39E-04	3,53E-04	2,53E-04	3,74E-04	2,41E-04	1,63E-04	2,46E-04	1,50E-04	9,25E-05
q30i	ε_{VM}	9,12E-04	3,94E-04	2,35E-04	5,52E-04	2,27E-04	1,58E-04	2,80E-04	1,41E-04	1,01E-04	6,28E-04	4,83E-04	3,50E-04	4,33E-04	3,28E-04	2,23E-04	2,93E-04	2,03E-04	1,25E-04
	ε_t	6,76E-04	2,92E-04	1,74E-04	4,09E-04	1,68E-04	1,17E-04	2,07E-04	1,04E-04	7,46E-05	4,65E-04	3,58E-04	2,59E-04	3,21E-04	2,43E-04	1,65E-04	2,17E-04	1,50E-04	9,27E-05
q30p	ε_{VM}	9,76E-04	4,09E-04	2,39E-04	5,76E-04	2,55E-04	1,60E-04	3,02E-04	1,62E-04	1,01E-04	7,26E-04	4,77E-04	3,37E-04	5,06E-04	3,24E-04	2,18E-04	3,34E-04	2,01E-04	1,24E-04
	ε_t	7,23E-04	3,03E-04	1,77E-04	4,27E-04	1,89E-04	1,19E-04	2,24E-04	1,20E-04	7,51E-05	5,37E-04	3,53E-04	2,49E-04	3,75E-04	2,40E-04	1,61E-04	2,47E-04	1,49E-04	9,17E-05
q40i	ε_{VM}	9,15E-04	3,94E-04	2,33E-04	5,54E-04	2,27E-04	1,57E-04	2,81E-04	1,41E-04	1,01E-04	6,27E-04	4,83E-04	3,49E-04	4,33E-04	3,28E-04	2,22E-04	2,93E-04	2,03E-04	1,25E-04
	ε_t	6,78E-04	2,92E-04	1,73E-04	4,10E-04	1,68E-04	1,17E-04	2,08E-04	1,04E-04	7,45E-05	4,65E-04	3,58E-04	2,59E-04	3,21E-04	2,43E-04	1,65E-04	2,17E-04	1,50E-04	9,25E-05
q40p	ε_{VM}	9,83E-04	4,08E-04	2,38E-04	5,79E-04	2,54E-04	1,60E-04	3,03E-04	1,57E-04	1,01E-04	7,25E-04	4,77E-04	3,36E-04	5,06E-04	3,24E-04	2,17E-04	3,34E-04	2,01E-04	1,23E-04
	ε_t	7,28E-04	3,02E-04	1,76E-04	4,29E-04	1,88E-04	1,19E-04	2,25E-04	1,16E-04	7,52E-05	5,37E-04	3,53E-04	2,49E-04	3,75E-04	2,40E-04	1,61E-04	2,47E-04	1,49E-04	9,14E-05
q50i	ε_{VM}	9,16E-04	3,95E-04	2,32E-04	5,55E-04	2,27E-04	1,57E-04	2,81E-04	1,40E-04	1,00E-04	6,25E-04	4,83E-04	3,49E-04	4,33E-04	3,28E-04	2,22E-04	2,94E-04	2,03E-04	1,25E-04
	ε_t	6,78E-04	2,92E-04	1,72E-04	4,11E-04	1,68E-04	1,16E-04	2,08E-04	1,04E-04	7,44E-05	4,63E-04	3,58E-04	2,58E-04	3,21E-04	2,43E-04	1,65E-04	2,17E-04	1,50E-04	9,23E-05
q50p	ε_{VM}	9,16E-04	3,79E-04	2,21E-04	5,39E-04	2,27E-04	1,47E-04	2,74E-04	1,41E-04	9,39E-05	7,21E-04	4,77E-04	3,36E-04	5,04E-04	3,24E-04	2,17E-04	3,34E-04	2,01E-04	1,23E-04
	ε_t	6,79E-04	2,81E-04	1,63E-04	3,99E-04	1,68E-04	1,09E-04	2,03E-04	1,04E-04	6,96E-05	5,34E-04	3,53E-04	2,49E-04	3,74E-04	2,40E-04	1,60E-04	2,47E-04	1,49E-04	9,12E-05
q60i	ε_{VM}	9,17E-04	3,95E-04	2,32E-04	5,56E-04	2,27E-04	1,57E-04	2,82E-04	1,40E-04	1,00E-04	6,25E-04	4,83E-04	3,49E-04	4,33E-04	3,28E-04	2,22E-04	2,94E-04	2,03E-04	1,25E-04
	ε_t	6,79E-04	2,92E-04	1,72E-04	4,12E-04	1,68E-04	1,16E-04	2,09E-04	1,04E-04	7,44E-05	4,63E-04	3,58E-04	2,58E-04	3,21E-04	2,43E-04	1,65E-04	2,17E-04	1,50E-04	9,23E-05
q60p	ε_{VM}	9,86E-04	4,09E-04	2,36E-04	5,82E-04	2,53E-04	1,59E-04	3,04E-04	1,61E-04	1,01E-04	7,21E-04	4,77E-04	3,36E-04	5,04E-04	3,24E-04	2,17E-04	3,34E-04	2,01E-04	1,23E-04
	ε_t	7,30E-04	3,03E-04	1,75E-04	4,31E-04	1,88E-04	1,18E-04	2,25E-04	1,19E-04	7,50E-05	5,34E-04	3,53E-04	2,49E-04	3,74E-04	2,40E-04	1,60E-04	2,47E-04	1,49E-04	9,12E-05
q70i	ε_{VM}	9,17E-04	3,95E-04	2,32E-04	5,56E-04	2,27E-04	1,57E-04	2,82E-04	1,40E-04	1,00E-04	6,17E-04	4,80E-04	3,48E-04	4,26E-04	3,26E-04	2,21E-04	2,88E-04	2,01E-04	1,24E-04
	ε_t	6,79E-04	2,92E-04	1,72E-04	4,12E-04	1,68E-04	1,16E-04	2,09E-04	1,04E-04	7,43E-05	4,57E-04	3,55E-04	2,58E-04	3,16E-04	2,41E-04	1,64E-04	2,14E-04	1,49E-04	9,18E-05
q70p	ε_{VM}	9,17E-04	4,09E-04	2,37E-04	5,83E-04	2,53E-04	1,60E-04	3,04E-04	1,61E-04	1,01E-04	7,11E-04	4,74E-04	3,34E-04	4,98E-04	3,22E-04	2,15E-04	3,30E-04	1,99E-04	1,22E-04
	ε_t	6,79E-04	3,03E-04	1,75E-04	4,32E-04	1,88E-04	1,18E-04	2,26E-04	1,19E-04	7,50E-05	5,27E-04	3,51E-04	2,48E-04	3,69E-04	2,38E-04	1,59E-04	2,44E-04	1,48E-04	9,06E-05
q80p	ε_{VM}	9,87E-04	4,09E-04	2,36E-04	5,83E-04	2,53E-04	1,59E-04	3,05E-04	1,61E-04	1,01E-04	7,20E-04	4,77E-04	3,36E-04	5,04E-04	3,24E-04	2,17E-04	3,34E-04	2,01E-04	1,23E-04
	ε_t	7,31E-04	3,03E-04	1,75E-04	4,32E-04	1,88E-04	1,18E-04	2,26E-04	1,19E-04	7,50E-05	5,34E-04	3,53E-04	2,49E-04	3,74E-04	2,40E-04	1,60E-04	2,47E-04	1,49E-04	9,12E-05
q90	ε_{VM}	9,86E-04	4,09E-04	2,36E-04	5,83E-04	2,53E-04	1,59E-04	3,05E-04	1,60E-04	1,01E-04	7,17E-04	4,77E-04	3,35E-04	5,03E-04	3,24E-04	2,16E-04	3,33E-04	2,01E-04	1,23E-04
	ε_t	7,30E-04	3,03E-04	1,75E-04	4,32E-04	1,88E-04	1,18E-04	2,26E-04	1,19E-04	7,49E-05	5,31E-04	3,54E-04	2,48E-04	3,73E-04	2,40E-04	1,60E-04	2,47E-04	1,49E-04	9,11E-05

Anexo I – continuação

Fenda	Ext. Sit.	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	ε _{VM}	8,09E-04	3,64E-04	1,87E-04	4,75E-04	1,94E-04	1,15E-04	2,39E-04	1,01E-04	7,29E-05	5,47E-04	4,11E-04	3,04E-04	3,71E-04	2,63E-04	1,86E-04	2,34E-04	1,57E-04	1,05E-04
	ε _t	5,99E-04	2,70E-04	1,39E-04	3,52E-04	1,43E-04	8,55E-05	1,77E-04	7,49E-05	5,40E-05	4,06E-04	3,04E-04	2,25E-04	2,75E-04	1,95E-04	1,38E-04	1,73E-04	1,16E-04	7,75E-05
q10	ε _{VM}	8,48E-04	4,02E-04	2,61E-04	4,84E-04	2,39E-04	1,66E-04	2,41E-04	1,46E-04	9,96E-05	6,05E-04	4,77E-04	3,52E-04	4,16E-04	3,18E-04	2,20E-04	2,84E-04	1,94E-04	1,21E-04
	ε _t	6,28E-04	2,98E-04	1,93E-04	3,58E-04	1,77E-04	1,23E-04	1,79E-04	1,08E-04	7,38E-05	4,48E-04	3,53E-04	2,61E-04	3,08E-04	2,36E-04	1,63E-04	2,10E-04	1,43E-04	9,00E-05
q20i	ε _{VM}	8,05E-04	3,79E-04	2,27E-04	4,66E-04	2,09E-04	1,44E-04	2,29E-04	1,20E-04	8,89E-05	5,71E-04	4,58E-04	3,33E-04	3,86E-04	3,02E-04	2,06E-04	2,61E-04	1,81E-04	1,14E-04
	ε _t	5,96E-04	2,81E-04	1,68E-04	3,45E-04	1,55E-04	1,07E-04	1,70E-04	8,87E-05	6,59E-05	4,23E-04	3,39E-04	2,47E-04	2,86E-04	2,24E-04	1,53E-04	1,94E-04	1,34E-04	8,47E-05
q20p	ε _{VM}	8,35E-04	3,65E-04	2,20E-04	4,74E-04	2,09E-04	1,40E-04	2,35E-04	1,25E-04	8,72E-05	6,23E-04	4,24E-04	3,20E-04	4,18E-04	2,80E-04	2,00E-04	2,63E-04	1,71E-04	1,13E-04
	ε _t	6,18E-04	2,70E-04	1,63E-04	3,51E-04	1,55E-04	1,04E-04	1,74E-04	9,22E-05	6,46E-05	4,62E-04	3,14E-04	2,37E-04	3,10E-04	2,07E-04	1,48E-04	1,95E-04	1,27E-04	8,35E-05
q30i	ε _{VM}	8,22E-04	3,79E-04	2,21E-04	4,74E-04	2,09E-04	1,40E-04	2,32E-04	1,19E-04	8,69E-05	5,89E-04	4,53E-04	3,26E-04	3,94E-04	2,98E-04	2,01E-04	2,62E-04	1,78E-04	1,12E-04
	ε _t	6,09E-04	2,81E-04	1,64E-04	3,51E-04	1,55E-04	1,04E-04	1,72E-04	8,80E-05	6,44E-05	4,36E-04	3,36E-04	2,42E-04	2,92E-04	2,21E-04	1,49E-04	1,94E-04	1,32E-04	8,29E-05
q30p	ε _{VM}	8,50E-04	3,58E-04	2,06E-04	4,82E-04	2,04E-04	1,32E-04	2,38E-04	1,21E-04	8,31E-05	6,24E-04	4,19E-04	3,06E-04	4,22E-04	2,74E-04	1,92E-04	2,68E-04	1,66E-04	1,09E-04
	ε _t	6,30E-04	2,66E-04	1,53E-04	3,57E-04	1,51E-04	9,78E-05	1,76E-04	8,98E-05	6,16E-05	4,62E-04	3,11E-04	2,27E-04	3,12E-04	2,03E-04	1,42E-04	1,98E-04	1,23E-04	8,07E-05
q40i	ε _{VM}	8,28E-04	3,79E-04	2,18E-04	4,77E-04	2,09E-04	1,39E-04	2,34E-04	1,18E-04	8,62E-05	5,90E-04	4,53E-04	3,24E-04	3,95E-04	2,98E-04	2,00E-04	2,62E-04	1,77E-04	1,11E-04
	ε _t	6,13E-04	2,81E-04	1,62E-04	3,53E-04	1,55E-04	1,03E-04	1,74E-04	8,77E-05	6,38E-05	4,37E-04	3,36E-04	2,40E-04	2,92E-04	2,21E-04	1,48E-04	1,94E-04	1,31E-04	8,22E-05
q40p	ε _{VM}	8,60E-04	3,59E-04	2,04E-04	4,86E-04	2,04E-04	1,31E-04	2,40E-04	1,21E-04	8,24E-05	6,25E-04	4,20E-04	3,03E-04	4,22E-04	2,75E-04	1,89E-04	2,68E-04	1,66E-04	1,08E-04
	ε _t	6,37E-04	2,66E-04	1,51E-04	3,60E-04	1,51E-04	9,67E-05	1,77E-04	8,96E-05	6,10E-05	4,63E-04	3,11E-04	2,25E-04	3,13E-04	2,04E-04	1,40E-04	1,98E-04	1,23E-04	7,97E-05
q50i	ε _{VM}	8,30E-04	3,80E-04	2,17E-04	4,79E-04	2,09E-04	1,38E-04	2,35E-04	1,18E-04	8,58E-05	5,87E-04	4,53E-04	3,24E-04	3,94E-04	2,98E-04	1,99E-04	2,62E-04	1,77E-04	1,10E-04
	ε _t	6,15E-04	2,82E-04	1,61E-04	3,55E-04	1,55E-04	1,02E-04	1,74E-04	8,75E-05	6,35E-05	4,35E-04	3,36E-04	2,40E-04	2,92E-04	2,21E-04	1,48E-04	1,94E-04	1,31E-04	8,18E-05
q50p	ε _{VM}	8,35E-04	3,56E-04	2,01E-04	4,73E-04	1,97E-04	1,24E-04	2,31E-04	1,11E-04	7,70E-05	6,18E-04	4,20E-04	3,03E-04	4,21E-04	2,75E-04	1,89E-04	2,68E-04	1,66E-04	1,07E-04
	ε _t	6,19E-04	2,63E-04	1,49E-04	3,51E-04	1,46E-04	9,22E-05	1,71E-04	8,25E-05	5,71E-05	4,58E-04	3,11E-04	2,24E-04	3,12E-04	2,04E-04	1,40E-04	1,99E-04	1,23E-04	7,91E-05
q60i	ε _{VM}	8,31E-04	3,80E-04	2,17E-04	4,80E-04	2,09E-04	1,38E-04	2,35E-04	1,18E-04	8,57E-05	5,88E-04	4,53E-04	3,24E-04	3,95E-04	2,98E-04	1,99E-04	2,62E-04	1,77E-04	1,10E-04
	ε _t	6,16E-04	2,82E-04	1,61E-04	3,55E-04	1,55E-04	1,02E-04	1,74E-04	8,73E-05	6,35E-05	4,36E-04	3,36E-04	2,40E-04	2,92E-04	2,20E-04	1,48E-04	1,94E-04	1,31E-04	8,18E-05
q60p	ε _{VM}	8,66E-04	3,60E-04	2,02E-04	4,91E-04	2,04E-04	1,29E-04	2,42E-04	1,20E-04	8,18E-05	6,19E-04	4,20E-04	3,02E-04	4,21E-04	2,75E-04	1,89E-04	2,68E-04	1,66E-04	1,07E-04
	ε _t	6,42E-04	2,66E-04	1,50E-04	3,64E-04	1,51E-04	9,59E-05	1,79E-04	8,92E-05	6,06E-05	4,58E-04	3,11E-04	2,24E-04	3,12E-04	2,04E-04	1,40E-04	1,98E-04	1,23E-04	7,91E-05
q70i	ε _{VM}	8,33E-04	3,80E-04	2,16E-04	4,80E-04	2,09E-04	1,37E-04	2,36E-04	1,18E-04	8,56E-05	5,79E-04	4,49E-04	3,23E-04	3,87E-04	2,95E-04	1,98E-04	2,56E-04	1,76E-04	1,10E-04
	ε _t	6,17E-04	2,82E-04	1,60E-04	3,56E-04	1,54E-04	1,02E-04	1,75E-04	8,73E-05	6,34E-05	4,29E-04	3,33E-04	2,40E-04	2,87E-04	2,19E-04	1,47E-04	1,89E-04	1,30E-04	8,13E-05
q70p	ε _{VM}	8,69E-04	3,60E-04	2,03E-04	4,92E-04	2,04E-04	1,30E-04	2,42E-04	1,21E-04	8,19E-05	6,08E-04	4,17E-04	3,02E-04	4,13E-04	2,73E-04	1,87E-04	2,63E-04	1,64E-04	1,06E-04
	ε _t	6,43E-04	2,66E-04	1,50E-04	3,64E-04	1,51E-04	9,60E-05	1,79E-04	8,93E-05	6,07E-05	4,51E-04	3,09E-04	2,24E-04	3,06E-04	2,02E-04	1,39E-04	1,95E-04	1,22E-04	7,85E-05
q80p	ε _{VM}	8,70E-04	3,60E-04	2,02E-04	4,93E-04	2,04E-04	1,29E-04	2,42E-04	1,20E-04	8,18E-05	6,18E-04	4,20E-04	3,03E-04	4,21E-04	2,75E-04	1,89E-04	2,68E-04	1,66E-04	1,07E-04
	ε _t	6,44E-04	2,66E-04	1,49E-04	3,65E-04	1,51E-04	9,57E-05	1,80E-04	8,91E-05	6,06E-05	4,58E-04	3,11E-04	2,24E-04	3,12E-04	2,04E-04	1,40E-04	1,98E-04	1,23E-04	7,90E-05
q90	ε _{VM}	8,70E-04	3,60E-04	2,01E-04	4,94E-04	2,03E-04	1,29E-04	2,43E-04	1,20E-04	8,14E-05	6,12E-04	4,20E-04	3,02E-04	4,19E-04	2,75E-04	1,88E-04	2,68E-04	1,66E-04	1,07E-04
	ε _t	6,44E-04	2,67E-04	1,49E-04	3,66E-04	1,51E-04	9,52E-05	1,80E-04	8,88E-05	6,03E-05	4,53E-04	3,11E-04	2,24E-04	3,11E-04	2,04E-04	1,40E-04	1,98E-04	1,23E-04	7,89E-05

Anexo I – continuação

Fenda	Ext. Sit.	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
1	ε _{VM}	9,55E-04	4,09E-04	1,90E-04	5,88E-04	2,33E-04	1,23E-04	3,13E-04	1,20E-04	7,71E-05	5,75E-04	4,37E-04	3,25E-04	4,02E-04	2,94E-04	2,07E-04	2,63E-04	1,84E-04	1,18E-04
	ε _t	7,08E-04	3,03E-04	1,41E-04	4,36E-04	1,72E-04	9,14E-05	2,32E-04	8,86E-05	5,71E-05	4,26E-04	3,24E-04	2,41E-04	2,98E-04	2,18E-04	1,54E-04	1,95E-04	1,37E-04	8,75E-05
q10	ε _{VM}	9,88E-04	4,17E-04	2,46E-04	5,81E-04	2,54E-04	1,58E-04	3,00E-04	1,50E-04	9,70E-05	6,79E-04	4,84E-04	3,51E-04	4,71E-04	3,31E-04	2,25E-04	3,18E-04	2,05E-04	1,26E-04
	ε _t	7,32E-04	3,09E-04	1,82E-04	4,31E-04	1,88E-04	1,17E-04	2,23E-04	1,11E-04	7,19E-05	5,03E-04	3,59E-04	2,60E-04	3,49E-04	2,45E-04	1,66E-04	2,36E-04	1,52E-04	9,34E-05
q20i	ε _{VM}	9,17E-04	3,99E-04	2,17E-04	5,57E-04	2,22E-04	1,40E-04	2,89E-04	1,19E-04	8,77E-05	5,92E-04	4,62E-04	3,45E-04	4,02E-04	3,15E-04	2,19E-04	2,66E-04	1,97E-04	1,23E-04
	ε _t	6,79E-04	2,95E-04	1,61E-04	4,12E-04	1,65E-04	1,04E-04	2,14E-04	8,83E-05	6,50E-05	4,39E-04	3,42E-04	2,55E-04	2,98E-04	2,33E-04	1,62E-04	1,97E-04	1,46E-04	9,14E-05
q20p	ε _{VM}	1,03E-03	4,23E-04	2,31E-04	6,09E-04	2,64E-04	1,48E-04	3,22E-04	1,55E-04	8,92E-05	7,13E-04	4,59E-04	3,31E-04	4,94E-04	3,14E-04	2,14E-04	3,22E-04	1,96E-04	1,22E-04
	ε _t	7,66E-04	3,14E-04	1,71E-04	4,51E-04	1,95E-04	1,10E-04	2,38E-04	1,15E-04	6,61E-05	5,28E-04	3,40E-04	2,45E-04	3,66E-04	2,32E-04	1,58E-04	2,39E-04	1,45E-04	9,04E-05
q30i	ε _{VM}	9,27E-04	4,02E-04	2,17E-04	5,62E-04	2,25E-04	1,40E-04	2,93E-04	1,20E-04	8,76E-05	6,00E-04	4,62E-04	3,42E-04	4,07E-04	3,14E-04	2,17E-04	2,68E-04	1,96E-04	1,22E-04
	ε _t	6,87E-04	2,98E-04	1,60E-04	4,17E-04	1,66E-04	1,04E-04	2,17E-04	8,91E-05	6,49E-05	4,44E-04	3,42E-04	2,53E-04	3,01E-04	2,33E-04	1,61E-04	1,99E-04	1,45E-04	9,07E-05
q30p	ε _{VM}	1,05E-03	4,21E-04	2,28E-04	6,13E-04	2,62E-04	1,48E-04	3,23E-04	1,56E-04	8,90E-05	7,04E-04	4,59E-04	3,25E-04	4,91E-04	3,13E-04	2,10E-04	3,23E-04	1,95E-04	1,21E-04
	ε _t	7,74E-04	3,12E-04	1,69E-04	4,54E-04	1,94E-04	1,10E-04	2,39E-04	1,15E-04	6,59E-05	5,21E-04	3,40E-04	2,41E-04	3,64E-04	2,32E-04	1,56E-04	2,39E-04	1,44E-04	8,93E-05
q40i	ε _{VM}	9,32E-04	4,02E-04	2,15E-04	5,65E-04	2,25E-04	1,39E-04	2,94E-04	1,20E-04	8,74E-05	5,97E-04	4,62E-04	3,41E-04	4,06E-04	3,14E-04	2,17E-04	2,68E-04	1,95E-04	1,22E-04
	ε _t	6,90E-04	2,98E-04	1,59E-04	4,19E-04	1,66E-04	1,03E-04	2,18E-04	8,88E-05	6,47E-05	4,42E-04	3,42E-04	2,53E-04	3,01E-04	2,33E-04	1,61E-04	1,99E-04	1,45E-04	9,05E-05
q40p	ε _{VM}	1,05E-03	4,20E-04	2,26E-04	6,17E-04	2,61E-04	1,48E-04	3,23E-04	1,55E-04	8,93E-05	7,00E-04	4,59E-04	3,24E-04	4,89E-04	3,13E-04	2,10E-04	3,22E-04	1,95E-04	1,20E-04
	ε _t	7,81E-04	3,11E-04	1,67E-04	4,57E-04	1,93E-04	1,10E-04	2,39E-04	1,15E-04	6,62E-05	5,19E-04	3,40E-04	2,40E-04	3,63E-04	2,32E-04	1,55E-04	2,38E-04	1,44E-04	8,90E-05
q50i	ε _{VM}	9,33E-04	4,03E-04	2,12E-04	5,67E-04	2,24E-04	1,38E-04	2,95E-04	1,19E-04	8,70E-05	5,92E-04	4,62E-04	3,41E-04	4,04E-04	3,14E-04	2,17E-04	2,68E-04	1,95E-04	1,22E-04
	ε _t	6,91E-04	2,98E-04	1,57E-04	4,20E-04	1,66E-04	1,02E-04	2,18E-04	8,84E-05	6,45E-05	4,39E-04	3,42E-04	2,52E-04	3,00E-04	2,33E-04	1,60E-04	1,99E-04	1,45E-04	9,03E-05
q50p	ε _{VM}	9,82E-04	3,91E-04	2,03E-04	5,72E-04	2,30E-04	1,33E-04	2,91E-04	1,33E-04	8,20E-05	6,91E-04	4,59E-04	3,24E-04	4,86E-04	3,13E-04	2,09E-04	3,21E-04	1,94E-04	1,20E-04
	ε _t	7,28E-04	2,90E-04	1,50E-04	4,24E-04	1,70E-04	9,82E-05	2,15E-04	9,83E-05	6,08E-05	5,12E-04	3,40E-04	2,40E-04	3,60E-04	2,32E-04	1,55E-04	2,38E-04	1,44E-04	8,87E-05
q60i	ε _{VM}	9,34E-04	4,03E-04	2,12E-04	5,68E-04	2,24E-04	1,38E-04	2,95E-04	1,19E-04	8,70E-05	5,92E-04	4,62E-04	3,41E-04	4,05E-04	3,14E-04	2,16E-04	2,68E-04	1,95E-04	1,22E-04
	ε _t	6,92E-04	2,99E-04	1,57E-04	4,20E-04	1,66E-04	1,02E-04	2,19E-04	8,83E-05	6,44E-05	4,39E-04	3,42E-04	2,52E-04	3,00E-04	2,33E-04	1,60E-04	1,99E-04	1,45E-04	9,03E-05
q60p	ε _{VM}	9,73E-04	4,21E-04	2,13E-04	6,21E-04	2,60E-04	1,47E-04	3,25E-04	1,54E-04	8,91E-05	6,91E-04	4,59E-04	3,24E-04	4,86E-04	3,12E-04	2,09E-04	3,21E-04	1,94E-04	1,20E-04
	ε _t	7,21E-04	3,12E-04	1,58E-04	4,60E-04	1,93E-04	1,09E-04	2,40E-04	1,14E-04	6,60E-05	5,12E-04	3,40E-04	2,40E-04	3,60E-04	2,31E-04	1,55E-04	2,38E-04	1,44E-04	8,87E-05
q70i	ε _{VM}	9,35E-04	4,03E-04	2,11E-04	5,68E-04	2,24E-04	1,38E-04	2,95E-04	1,19E-04	8,70E-05	5,84E-04	4,58E-04	3,40E-04	3,98E-04	3,11E-04	2,15E-04	2,63E-04	1,94E-04	1,21E-04
	ε _t	6,93E-04	2,99E-04	1,57E-04	4,21E-04	1,66E-04	1,02E-04	2,19E-04	8,82E-05	6,44E-05	4,32E-04	3,39E-04	2,52E-04	2,95E-04	2,30E-04	1,60E-04	1,95E-04	1,43E-04	8,97E-05
q70p	ε _{VM}	1,06E-03	4,21E-04	2,24E-04	6,22E-04	2,60E-04	1,47E-04	3,25E-04	1,54E-04	8,92E-05	6,82E-04	4,56E-04	3,22E-04	4,80E-04	3,10E-04	2,08E-04	3,17E-04	1,93E-04	1,19E-04
	ε _t	7,86E-04	3,12E-04	1,66E-04	4,61E-04	1,93E-04	1,09E-04	2,40E-04	1,14E-04	6,61E-05	5,05E-04	3,37E-04	2,39E-04	3,55E-04	2,30E-04	1,54E-04	2,35E-04	1,43E-04	8,81E-05
q80p	ε _{VM}	1,06E-03	4,21E-04	2,22E-04	6,23E-04	2,60E-04	1,47E-04	3,25E-04	1,54E-04	8,90E-05	6,89E-04	4,59E-04	3,24E-04	4,85E-04	3,12E-04	2,09E-04	3,21E-04	1,94E-04	1,20E-04
	ε _t	7,87E-04	3,12E-04	1,65E-04	4,61E-04	1,92E-04	1,09E-04	2,41E-04	1,14E-04	6,60E-05	5,10E-04	3,40E-04	2,40E-04	3,59E-04	2,31E-04	1,55E-04	2,38E-04	1,44E-04	8,87E-05
q90	ε _{VM}	1,06E-03	4,21E-04	2,21E-04	6,23E-04	2,60E-04	1,46E-04	3,26E-04	1,54E-04	8,87E-05	6,81E-04	4,59E-04	3,23E-04	4,83E-04	3,12E-04	2,09E-04	3,20E-04	1,94E-04	1,20E-04
	ε _t	7,86E-04	3,12E-04	1,64E-04	4,62E-04	1,92E-04	1,08E-04	2,41E-04	1,14E-04	6,57E-05	5,04E-04	3,40E-04	2,40E-04	3,58E-04	2,31E-04	1,55E-04	2,37E-04	1,44E-04	8,86E-05

Anexo I – continuação

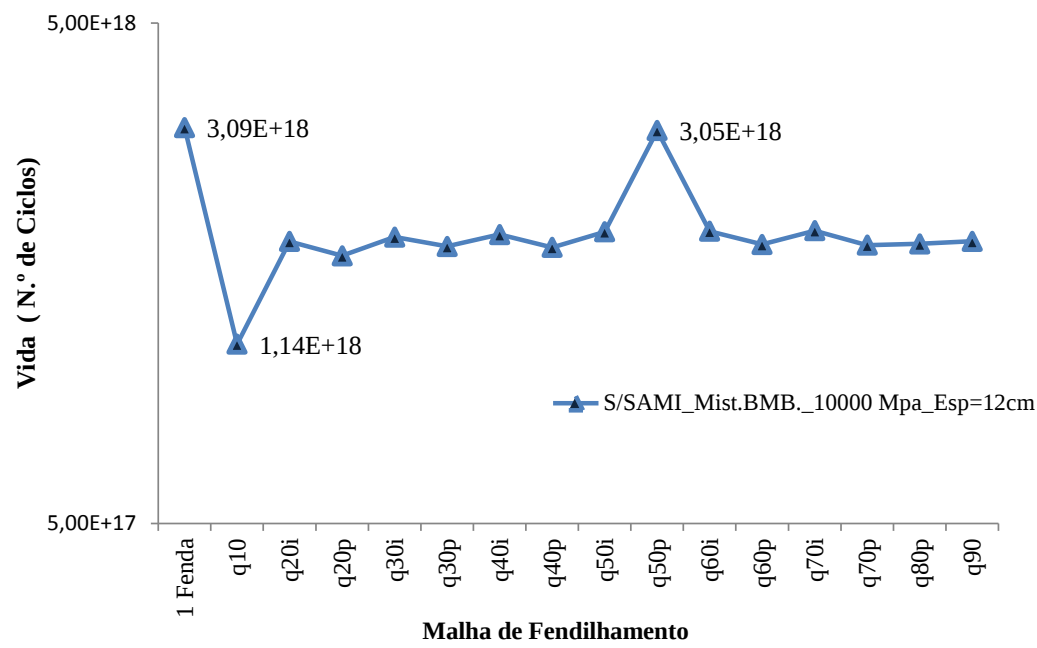
Fenda	Ext. Sit.	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
1	ε _{VM}	7,90E-04	3,67E-04	1,70E-04	4,61E-04	1,91E-04	9,20E-05	2,35E-04	8,64E-05	5,50E-05	4,86E-04	3,85E-04	2,92E-04	3,28E-04	2,42E-04	1,75E-04	2,06E-04	1,41E-04	9,73E-05
	ε _t	5,85E-04	2,72E-04	1,26E-04	3,42E-04	1,42E-04	6,81E-05	1,74E-04	6,40E-05	4,08E-05	3,60E-04	2,85E-04	2,16E-04	2,43E-04	1,79E-04	1,29E-04	1,52E-04	1,05E-04	7,21E-05
q10	ε _{VM}	8,60E-04	3,87E-04	2,38E-04	4,86E-04	2,19E-04	1,45E-04	2,37E-04	1,23E-04	8,63E-05	5,79E-04	4,54E-04	3,42E-04	3,93E-04	3,03E-04	2,13E-04	2,63E-04	1,85E-04	1,18E-04
	ε _t	6,37E-04	2,86E-04	1,76E-04	3,60E-04	1,63E-04	1,08E-04	1,76E-04	9,11E-05	6,39E-05	4,29E-04	3,36E-04	2,53E-04	2,91E-04	2,25E-04	1,58E-04	1,95E-04	1,37E-04	8,74E-05
q20i	ε _{VM}	7,92E-04	3,71E-04	2,04E-04	4,53E-04	1,96E-04	1,23E-04	2,24E-04	9,67E-05	7,44E-05	5,40E-04	4,34E-04	3,23E-04	3,59E-04	2,86E-04	1,99E-04	2,37E-04	1,71E-04	1,10E-04
	ε _t	5,87E-04	2,75E-04	1,51E-04	3,35E-04	1,45E-04	9,13E-05	1,66E-04	7,16E-05	5,51E-05	4,00E-04	3,22E-04	2,40E-04	2,66E-04	2,12E-04	1,47E-04	1,75E-04	1,27E-04	8,17E-05
q20p	ε _{VM}	8,55E-04	3,59E-04	1,95E-04	4,79E-04	1,98E-04	1,20E-04	2,34E-04	1,08E-04	7,22E-05	5,95E-04	4,01E-04	3,09E-04	3,97E-04	2,64E-04	1,92E-04	2,46E-04	1,62E-04	1,08E-04
	ε _t	6,33E-04	2,66E-04	1,45E-04	3,55E-04	1,47E-04	8,86E-05	1,74E-04	8,01E-05	5,35E-05	4,41E-04	2,97E-04	2,29E-04	2,94E-04	1,96E-04	1,42E-04	1,82E-04	1,20E-04	8,04E-05
q30i	ε _{VM}	8,15E-04	3,75E-04	1,99E-04	4,64E-04	1,98E-04	1,20E-04	2,29E-04	9,69E-05	7,25E-05	5,59E-04	4,30E-04	3,16E-04	3,68E-04	2,82E-04	1,93E-04	2,38E-04	1,68E-04	1,07E-04
	ε _t	6,04E-04	2,78E-04	1,47E-04	3,43E-04	1,46E-04	8,87E-05	1,69E-04	7,18E-05	5,37E-05	4,14E-04	3,18E-04	2,34E-04	2,72E-04	2,09E-04	1,43E-04	1,76E-04	1,25E-04	7,96E-05
q30p	ε _{VM}	8,72E-04	3,56E-04	1,80E-04	4,87E-04	1,94E-04	1,12E-04	2,37E-04	1,06E-04	6,81E-05	5,83E-04	3,95E-04	2,93E-04	3,94E-04	2,58E-04	1,82E-04	2,48E-04	1,56E-04	1,04E-04
	ε _t	6,46E-04	2,64E-04	1,34E-04	3,61E-04	1,43E-04	8,27E-05	1,76E-04	7,83E-05	5,04E-05	4,32E-04	2,93E-04	2,17E-04	2,92E-04	1,91E-04	1,35E-04	1,84E-04	1,15E-04	7,69E-05
q40i	ε _{VM}	8,22E-04	3,76E-04	1,96E-04	4,68E-04	1,98E-04	1,18E-04	2,31E-04	9,67E-05	7,15E-05	5,57E-04	4,30E-04	3,14E-04	3,67E-04	2,82E-04	1,92E-04	2,38E-04	1,68E-04	1,06E-04
	ε _t	6,09E-04	2,79E-04	1,45E-04	3,46E-04	1,47E-04	8,73E-05	1,71E-04	7,16E-05	5,30E-05	4,13E-04	3,18E-04	2,33E-04	2,72E-04	2,09E-04	1,42E-04	1,76E-04	1,24E-04	7,87E-05
q40p	ε _{VM}	8,82E-04	3,57E-04	1,78E-04	4,92E-04	1,93E-04	1,11E-04	2,38E-04	1,06E-04	6,77E-05	5,79E-04	3,95E-04	2,90E-04	3,91E-04	2,58E-04	1,80E-04	2,47E-04	1,55E-04	1,02E-04
	ε _t	6,53E-04	2,65E-04	1,32E-04	3,64E-04	1,43E-04	8,19E-05	1,77E-04	7,82E-05	5,01E-05	4,29E-04	2,93E-04	2,15E-04	2,90E-04	1,91E-04	1,42E-04	1,83E-04	1,15E-04	7,57E-05
q50i	ε _{VM}	8,24E-04	3,78E-04	1,94E-04	4,70E-04	1,98E-04	1,16E-04	2,32E-04	9,60E-05	7,09E-05	5,50E-04	4,30E-04	3,14E-04	3,65E-04	2,81E-04	1,91E-04	2,37E-04	1,67E-04	1,06E-04
	ε _t	6,10E-04	2,80E-04	1,44E-04	3,48E-04	1,47E-04	8,62E-05	1,72E-04	7,11E-05	5,25E-05	4,07E-04	3,18E-04	2,32E-04	2,70E-04	2,08E-04	1,42E-04	1,76E-04	1,24E-04	7,83E-05
q50p	ε _{VM}	8,59E-04	3,60E-04	1,78E-04	4,80E-04	1,88E-04	1,04E-04	2,30E-04	9,62E-05	6,25E-05	5,64E-04	3,95E-04	2,89E-04	3,86E-04	2,58E-04	1,79E-04	2,46E-04	1,55E-04	1,01E-04
	ε _t	6,37E-04	2,67E-04	1,32E-04	3,55E-04	1,39E-04	7,68E-05	1,71E-04	7,13E-05	4,63E-05	4,18E-04	2,93E-04	2,14E-04	2,70E-04	1,91E-04	1,32E-04	1,82E-04	1,15E-04	7,50E-05
q60i	ε _{VM}	8,25E-04	3,78E-04	1,94E-04	4,71E-04	1,98E-04	1,16E-04	2,32E-04	9,58E-05	7,08E-05	5,49E-04	4,30E-04	3,14E-04	3,65E-04	2,81E-04	1,91E-04	2,37E-04	1,67E-04	1,06E-04
	ε _t	6,11E-04	2,80E-04	1,44E-04	3,49E-04	1,47E-04	8,59E-05	1,72E-04	7,10E-05	5,25E-05	4,07E-04	3,18E-04	2,32E-04	2,70E-04	2,08E-04	1,42E-04	1,75E-04	1,24E-04	7,84E-05
q60p	ε _{VM}	8,91E-04	3,61E-04	1,76E-04	4,98E-04	1,94E-04	1,09E-04	2,42E-04	1,05E-04	6,70E-05	5,64E-04	3,95E-04	2,89E-04	3,86E-04	2,58E-04	1,79E-04	2,46E-04	1,55E-04	1,01E-04
	ε _t	6,60E-04	2,67E-04	1,31E-04	3,69E-04	1,43E-04	8,06E-05	1,79E-04	7,76E-05	4,96E-05	4,18E-04	2,93E-04	2,14E-04	2,86E-04	1,91E-04	1,32E-04	1,82E-04	1,15E-04	7,50E-05
q70i	ε _{VM}	8,27E-04	3,78E-04	1,93E-04	4,71E-04	1,98E-04	1,16E-04	2,32E-04	9,56E-05	7,08E-05	5,40E-04	4,25E-04	3,13E-04	3,57E-04	2,78E-04	1,90E-04	2,30E-04	1,66E-04	1,05E-04
	ε _t	6,12E-04	2,80E-04	1,43E-04	3,49E-04	1,47E-04	8,57E-05	1,72E-04	7,08E-05	5,24E-05	4,00E-04	3,15E-04	2,32E-04	2,64E-04	2,06E-04	1,41E-04	1,71E-04	1,23E-04	7,79E-05
q70p	ε _{VM}	8,94E-04	3,61E-04	1,78E-04	4,99E-04	1,94E-04	1,09E-04	2,42E-04	1,05E-04	6,74E-05	5,54E-04	3,91E-04	2,89E-04	3,78E-04	2,55E-04	1,78E-04	2,40E-04	1,53E-04	1,00E-04
	ε _t	6,62E-04	2,68E-04	1,32E-04	3,70E-04	1,44E-04	8,11E-05	1,79E-04	7,79E-05	4,99E-05	4,10E-04	2,90E-04	2,14E-04	2,80E-04	1,89E-04	1,32E-04	1,78E-04	1,14E-04	7,44E-05
q80p	ε _{VM}	8,96E-04	3,62E-04	1,76E-04	5,01E-04	1,93E-04	1,09E-04	2,42E-04	1,05E-04	6,71E-05	5,62E-04	3,95E-04	2,90E-04	3,85E-04	2,58E-04	1,79E-04	2,45E-04	1,55E-04	1,01E-04
	ε _t	6,64E-04	2,68E-04	1,30E-04	3,71E-04	1,43E-04	8,04E-05	1,80E-04	7,75E-05	4,97E-05	4,16E-04	2,93E-04	2,14E-04	2,85E-04	1,91E-04	1,32E-04	1,82E-04	1,15E-04	7,50E-05
q90	ε _{VM}	8,98E-04	3,64E-04	1,74E-04	5,04E-04	1,93E-04	1,07E-04	2,44E-04	1,04E-04	6,64E-05	5,48E-04	3,96E-04	2,89E-04	3,80E-04	2,58E-04	1,78E-04	2,44E-04	1,55E-04	1,01E-04
	ε _t	6,65E-04	2,70E-04	1,29E-04	3,73E-04	1,43E-04	7,94E-05	1,81E-04	7,69E-05	4,92E-05	4,06E-04	2,93E-04	2,14E-04	2,82E-04	1,91E-04	1,32E-04	1,81E-04	1,15E-04	7,48E-05

Anexo I – continuação

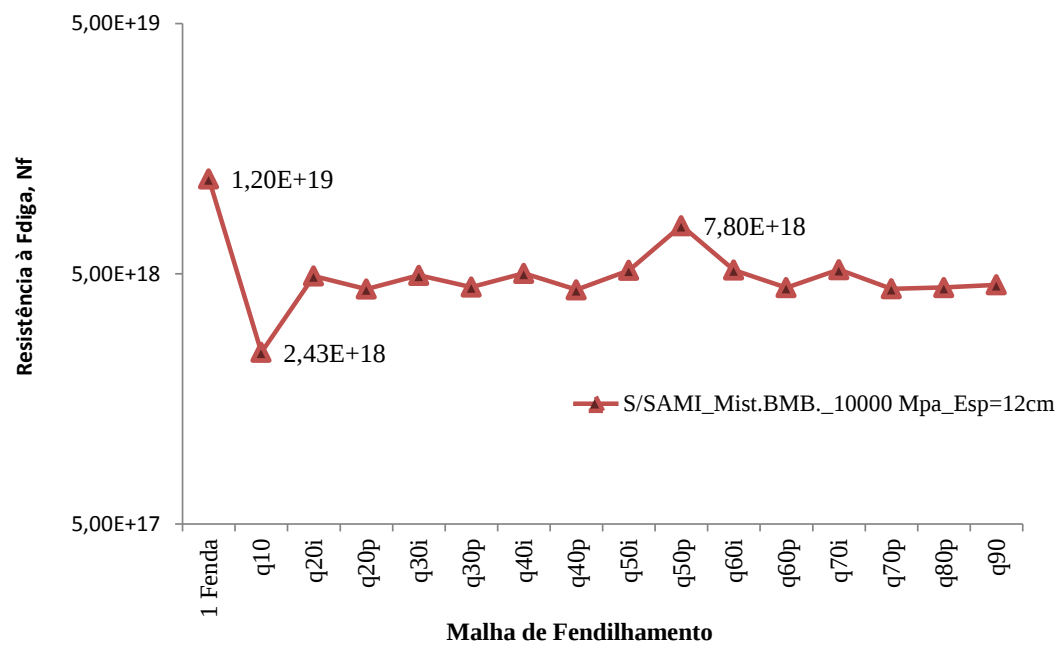
Fenda	Ext. Sit.	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
1	ε _{VM}	6,02E-04	3,63E-04	2,37E-04	3,59E-04	1,87E-04	1,00E-04	1,74E-04	7,63E-05	3,10E-05	1,66E-03	1,35E-03	9,70E-04	1,37E-03	1,13E-03	7,80E-04	1,22E-03	9,42E-04	5,60E-04	9,85E-04	7,84E-04	5,64E-04
	ε _t	4,46E-04	2,69E-04	1,75E-04	2,66E-04	1,38E-04	7,42E-05	1,29E-04	5,65E-05	2,30E-05	1,23E-03	1,00E-03	7,18E-04	1,01E-03	8,38E-04	5,78E-04	9,03E-04	6,98E-04	4,15E-04	7,30E-04	5,80E-04	4,18E-04
q10	ε _{VM}	8,35E-04	3,63E-04	2,29E-04	4,67E-04	1,98E-04	1,33E-04	2,22E-04	1,04E-04	6,96E-05	2,95E-03	1,75E-03	1,08E-03	2,54E-03	1,48E-03	8,37E-04	2,18E-03	1,16E-03	5,46E-04	1,10E-03	8,50E-04	5,56E-04
	ε _t	6,19E-04	2,69E-04	1,69E-04	3,46E-04	1,46E-04	9,89E-05	1,64E-04	7,70E-05	5,15E-05	2,18E-03	1,30E-03	8,03E-04	1,88E-03	1,10E-03	6,20E-04	1,61E-03	8,61E-04	4,05E-04	8,11E-04	6,29E-04	4,12E-04
q20i	ε _{VM}	7,19E-04	3,55E-04	1,90E-04	3,97E-04	1,83E-04	1,04E-04	1,85E-04	8,16E-05	5,38E-05	2,17E-03	1,42E-03	8,91E-04	1,78E-03	1,16E-03	6,84E-04	1,48E-03	8,99E-04	4,62E-04	8,97E-04	6,93E-04	4,70E-04
	ε _t	5,32E-04	2,63E-04	1,41E-04	2,94E-04	1,36E-04	7,70E-05	1,37E-04	6,04E-05	3,99E-05	1,61E-03	1,05E-03	6,60E-04	1,32E-03	8,59E-04	5,07E-04	1,10E-03	6,66E-04	3,42E-04	6,64E-04	5,14E-04	3,48E-04
q20p	ε _{VM}	8,06E-04	3,57E-04	1,65E-04	4,49E-04	1,80E-04	9,77E-05	2,10E-04	9,11E-05	5,74E-05	3,72E-03	2,37E-03	1,43E-03	3,18E-03	2,04E-03	1,10E-03	2,73E-03	1,65E-03	7,21E-04	1,43E-03	1,11E-03	7,28E-04
	ε _t	5,97E-04	2,64E-04	1,22E-04	3,32E-04	1,33E-04	7,24E-05	1,56E-04	6,75E-05	4,25E-05	2,76E-03	1,76E-03	1,06E-03	2,35E-03	1,51E-03	8,18E-04	2,02E-03	1,22E-03	5,34E-04	1,06E-03	8,23E-04	5,39E-04
q30i	ε _{VM}	7,40E-04	3,65E-04	1,87E-04	4,09E-04	1,88E-04	9,80E-05	1,90E-04	8,32E-05	5,08E-05	2,39E-03	1,49E-03	8,75E-04	1,95E-03	1,19E-03	6,48E-04	1,59E-03	8,93E-04	4,26E-04	8,79E-04	6,55E-04	4,33E-04
	ε _t	5,48E-04	2,71E-04	1,39E-04	3,03E-04	1,39E-04	7,26E-05	1,41E-04	6,16E-05	3,76E-05	1,77E-03	1,11E-03	6,48E-04	1,44E-03	8,82E-04	4,80E-04	1,18E-03	6,61E-04	3,15E-04	6,51E-04	4,85E-04	3,21E-04
q30p	ε _{VM}	7,99E-04	3,64E-04	1,65E-04	4,47E-04	1,78E-04	7,58E-05	2,08E-04	8,16E-05	4,99E-05	3,51E-03	2,41E-03	1,59E-03	3,01E-03	2,10E-03	1,26E-03	2,58E-03	1,76E-03	8,59E-04	1,59E-03	1,26E-03	8,65E-04
	ε _t	5,92E-04	2,70E-04	1,22E-04	3,31E-04	1,32E-04	5,62E-05	1,54E-04	6,05E-05	3,70E-05	2,60E-03	1,79E-03	1,18E-03	2,23E-03	1,55E-03	9,34E-04	1,91E-03	1,30E-03	6,37E-04	1,18E-03	9,37E-04	6,41E-04
q40i	ε _{VM}	7,40E-04	3,69E-04	1,87E-04	4,10E-04	1,90E-04	9,41E-05	1,92E-04	8,38E-05	4,79E-05	2,37E-03	1,52E-03	8,82E-04	1,95E-03	1,21E-03	6,40E-04	1,60E-03	8,93E-04	4,10E-04	8,85E-04	6,46E-04	4,16E-04
	ε _t	5,48E-04	2,73E-04	1,39E-04	3,04E-04	1,40E-04	6,97E-05	1,42E-04	6,21E-05	3,55E-05	1,75E-03	1,12E-03	6,53E-04	1,44E-03	8,93E-04	4,74E-04	1,18E-03	6,62E-04	3,04E-04	6,56E-04	4,79E-04	3,08E-04
q40p	ε _{VM}	7,92E-04	3,63E-04	1,73E-04	4,42E-04	1,76E-04	7,42E-05	2,05E-04	7,99E-05	4,92E-05	3,42E-03	2,35E-03	1,58E-03	2,89E-03	2,01E-03	1,25E-03	2,44E-03	1,68E-03	8,73E-04	1,58E-03	1,26E-03	8,77E-04
	ε _t	5,86E-04	2,69E-04	1,28E-04	3,28E-04	1,30E-04	5,50E-05	1,52E-04	5,92E-05	3,64E-05	2,54E-03	1,74E-03	1,17E-03	2,14E-03	1,49E-03	9,30E-04	1,81E-03	1,24E-03	6,46E-04	1,17E-03	9,31E-04	6,50E-04
q50i	ε _{VM}	7,34E-04	3,72E-04	1,94E-04	4,10E-04	1,91E-04	9,15E-05	1,92E-04	8,26E-05	4,53E-05	2,32E-03	1,50E-03	8,95E-04	1,84E-03	1,18E-03	6,45E-04	1,47E-03	8,89E-04	4,08E-04	9,03E-04	6,55E-04	4,16E-04
	ε _t	5,44E-04	2,76E-04	1,44E-04	3,04E-04	1,42E-04	6,78E-05	1,42E-04	6,12E-05	3,36E-05	1,72E-03	1,11E-03	6,63E-04	1,36E-03	8,76E-04	4,78E-04	1,09E-03	6,59E-04	3,03E-04	6,69E-04	4,85E-04	3,08E-04
q50p	ε _{VM}	7,92E-04	3,91E-04	2,13E-04	4,49E-04	1,91E-04	8,08E-05	2,06E-04	7,60E-05	3,77E-05	3,09E-03	2,23E-03	1,56E-03	2,67E-03	1,93E-03	1,24E-03	2,30E-03	1,61E-03	8,76E-04	1,55E-03	1,24E-03	8,80E-04
	ε _t	5,86E-04	2,90E-04	1,58E-04	3,33E-04	1,41E-04	5,98E-05	1,52E-04	5,63E-05	2,80E-05	2,29E-03	1,66E-03	1,15E-03	1,98E-03	1,43E-03	9,18E-04	1,70E-03	1,19E-03	6,49E-04	1,15E-03	9,20E-04	6,52E-04
q60i	ε _{VM}	7,30E-04	3,71E-04	1,94E-04	4,08E-04	1,90E-04	9,10E-05	1,91E-04	8,19E-05	4,51E-05	2,21E-03	1,49E-03	8,93E-04	1,85E-03	1,20E-03	6,48E-04	1,55E-03	8,93E-04	4,10E-04	9,13E-04	6,66E-04	4,26E-04
	ε _t	5,41E-04	2,75E-04	1,44E-04	3,02E-04	1,41E-04	6,74E-05	1,41E-04	6,06E-05	3,34E-05	1,63E-03	1,10E-03	6,61E-04	1,37E-03	8,86E-04	4,80E-04	1,14E-03	6,61E-04	3,03E-04	6,76E-04	4,93E-04	3,15E-04
q60p	ε _{VM}	7,98E-04	3,80E-04	1,95E-04	4,54E-04	1,85E-04	7,39E-05	2,11E-04	7,86E-05	4,43E-05	3,06E-03	2,21E-03	1,53E-03	2,64E-03	1,89E-03	1,21E-03	2,24E-03	1,56E-03	8,51E-04	1,53E-03	1,21E-03	8,55E-04
	ε _t	5,91E-04	2,81E-04	1,44E-04	3,36E-04	1,37E-04	5,47E-05	1,56E-04	5,82E-05	3,28E-05	2,27E-03	1,63E-03	1,13E-03	1,95E-03	1,40E-03	8,96E-04	1,66E-03	1,16E-03	6,30E-04	1,13E-03	8,98E-04	6,34E-04
q70i	ε _{VM}	7,28E-04	3,71E-04	1,95E-04	4,07E-04	1,90E-04	9,07E-05	1,90E-04	8,13E-05	4,48E-05	1,92E-03	1,32E-03	7,97E-04	1,60E-03	1,05E-03	5,73E-04	1,33E-03	7,80E-04	3,60E-04	8,02E-04	5,81E-04	3,67E-04
	ε _t	5,39E-04	2,75E-04	1,45E-04	3,02E-04	1,41E-04	6,72E-05	1,41E-04	6,02E-05	3,32E-05	1,42E-03	9,76E-04	5,90E-04	1,19E-03	7,78E-04	4,25E-04	9,88E-04	5,78E-04	2,67E-04	5,94E-04	4,30E-04	2,72E-04
q70p	ε _{VM}	7,96E-04	3,76E-04	1,91E-04	4,50E-04	1,83E-04	7,75E-05	2,10E-04	8,06E-05	4,72E-05	2,86E-03	2,01E-03	1,37E-03	2,41E-03	1,68E-03	1,06E-03	1,99E-03	1,36E-03	7,35E-04	1,36E-03	1,06E-03	7,40E-04
	ε _t	5,90E-04	2,79E-04	1,42E-04	3,34E-04	1,36E-04	5,74E-05	1,55E-04	5,97E-05	3,50E-05	2,12E-03	1,49E-03	1,01E-03	1,78E-03	1,24E-03	7,85E-04	1,48E-03	1,01E-03	5,45E-04	1,01E-03	7,87E-04	5,48E-04
q80p	ε _{VM}	8,08E-04	3,86E-04	1,98E-04	4,59E-04	1,88E-04	7,56E-05	2,13E-04	7,98E-05	4,52E-05	3,06E-03	2,19E-03	1,50E-03	2,61E-03	1,84E-03	1,17E-03	2,19E-03	1,50E-03	8,04E-04	1,49E-03	1,17E-03	8,08E-04
	ε _t	5,98E-04	2,86E-04	1,47E-04	3,40E-04	1,39E-04	5,60E-05	1,58E-04	5,91E-05	3,35E-05	2,27E-03	1,62E-03	1,11E-03	1,94E-03	1,37E-03	8,63E-04	1,62E-03	1,11E-03	5,95E-04	1,11E-03	8,65E-04	5,99E-04
q90	ε _{VM}	8,42E-04	4,16E-04	2,24E-04	4,84E-04	2,03E-04	8,15E-05	2,23E-04	7,98E-05	3,86E-05	2,40E-03	1,95E-03	1,42E-03	2,18E-03	1,70E-03	1,13E-03	1,94E-03	1,41E-03	8,01E-04	1,42E-03	1,13E-03	8,06E-04
	ε _t	6,23E-04	3,08E-04	1,66E-04	3,58E-04	1,50E-04	6,04E-05	1,65E-04	5,91E-05	2,86E-05	1,77E-03	1,44E-03	1,05E-03	1,61E-03	1,26E-03	8,39E-04	1,44E-03	1,04E-03	5,93E-04	1,05E-03	8,41E-04	5,97E-04

Anexo II

$e_f=7,5\text{ cm}$; $E_f=2000\text{ Mpa}$)

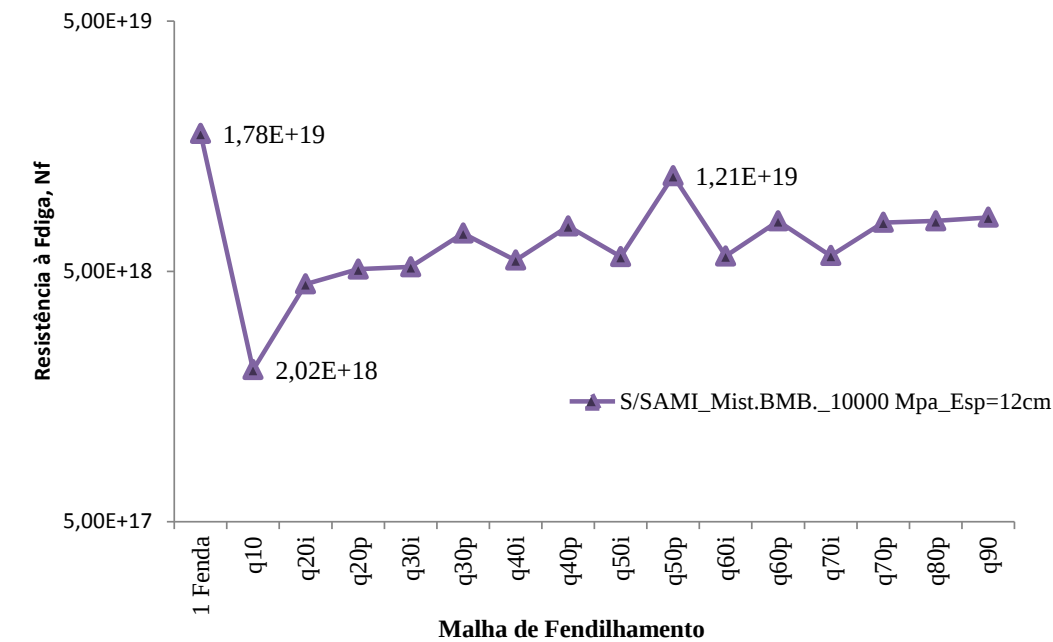


$e_f=7,5\text{ cm}$; $E_f=4000\text{ Mpa}$

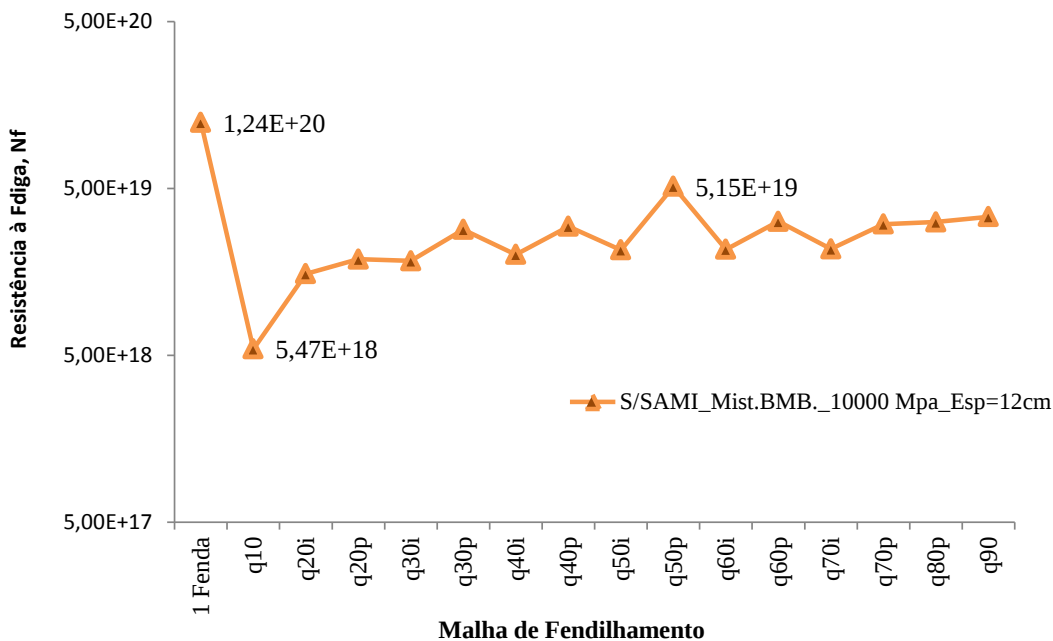


Anexo II – continuação

$e_f=15\text{ cm}$; $E_f=2000\text{ Mpa}$



$e_f=15\text{ cm}$; $E_f=4000\text{ Mpa}$



Anexo II – continuação

$e_f=20\text{ cm}$; $E_f=20000\text{ Mpa}$

