DM

Vantagens da Utilização de Borracha Reagida e Ativada na Reabilitação de Pavimentos

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Duarte José Gonçalves Manica
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

UNIVERSIDADE da MADEIRA
A Nossa Universidade
www.uma.pt

novembro | 2017

Vantagens da Utilização de Borracha Reagida e Ativada na Reabilitação de Pavimentos

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Duarte José Gonçalves Manica
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTADOR
Jorge Barreira de Sousa

UNIVERSIDADE da MADEIRA

Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia

Vantagens da Utilização de Borracha Reagida e Ativada na Reabilitação de Pavimentos

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Universidade da Madeira

por

DUARTE JOSÉ GONÇALVES MANICA

Licenciado em Engenharia Civil (Pós-Bolonha)

Orientador

Prof. Doutor Eng.º Jorge Barreira de Sousa

novembro de 2017

Título: Vantagens da utilização de borracha reagida e ativada na reabilitação de pavimentos

Palavras-Chave: Pavimentos rodoviários flexíveis; Reabilitação; Betume-borracha; Borracha reagida e ativada (RAR), Mistura betuminosa com borracha.

Keywords: Road Pavements; Rehabilitation; Bitumen-Crumb Rubber; Reacted and Activated Rubber (RAR), Hot Mix Asphalt, Asphalt Rubber Mixes.

Autor: DUARTE MANICA

FCEE - Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia

Campus Universitário de Penteada

9020-015 Funchal - Portugal. s/n

Telefone +351 291 705 230

Correio eletrónico: secretariadocentros@uma.pt

Funchal, Madeira

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado uma realidade e aos quais estarei eternamente grato. Por isso a minha profunda gratidão:

Ao meu orientador, Professor Doutor Eng.º Jorge Barreira de Sousa, pelo total apoio, disponibilidade, pelo saber que transmitiu, pelas opiniões e criticas, total colaboração no solucionar de dúvidas e problemas que foram surgindo ao longo da realização deste trabalho e por todas as palavras de incentivo.

Ao Engenheiro Jorge Pereira, pela clareza, rigor, paciência, disponibilidade demonstrada e conselhos durante a realização desta dissertação: o meu muito obrigado.

À Engenheira Rossana Sousa e ao Engenheiro Henrique Miranda, pela orientação, ajuda e permanente disponibilidade, que me permitiram encontrar informações e soluções que em muito contribuíram para a execução desta tese. Aos técnicos da CONSULPAV, com quem trabalhei diretamente, presto tributo por tudo o que me ensinaram e ajudaram durante a realização dos ensaios.

À RAM /DRE, por facultar o projeto do trecho piloto, pela autorização para executar os ensaios de caracterização da atual situação, pelos recenseamentos de tráfego, mas sobretudo, pela abertura patenteada a reequacionarem a construção/manutenção pavimentos betuminosos.

À VIALITORAL, pela disponibilização de registos essenciais para a realização de parte desta dissertação, pelos esclarecimentos e pelos seus funcionários sempre prestáveis.

À AFAVIAS, pela assistência técnica prestada, caracterizada por: acesso às centrais, recolha de documentação, recolha de materiais, amostras e informações recolhidas em obras.

Ao LNEC, pela rapidez e disponibilidade na realização de um ensaio fulcral à conclusão desta dissertação.

Aos meus amigos e colegas que estiveram ao meu lado durante esta fase, pelo companheirismo, força e apoio em certos momentos difíceis.

As minhas irmãs, pela amizade, carinho, força e preocupação demonstrada nos momentos de maior aflição.

Aos meus pais, por serem modelos de coragem, pelo seu apoio incondicional, incentivo, amizade e paciência demonstrados e total ajuda na superação dos obstáculos que ao longo desta caminhada foram surgindo.

Tendo consciência que sozinho nada disto teria sido possível, dirijo um agradecimento especial à Licínia, minha namorada, pelo apoio e carinho diários, pelas palavras de incentivo e confiança, em todos os momentos.

Por fim, agradeço a todos os que mesmo que não explicitamente mencionados, sob as mais variadas formas, contribuíram para que eu terminasse este trabalho.

RESUMO

Todas as estruturas ao fim de determinado período de vida exigem intervenções que lhes permitam manter uma qualidade adequada às funções que desempenham e os pavimentos rodoviários não são, nesse campo, exceção, sendo alvo de frequentes reparações destinadas a lhes devolver níveis de funcionalidade, segurança e conforto adequados.

Em Portugal, a maioria dos pavimentos rodoviários são do tipo flexível, razão pela qual esta dissertação abordará apenas esse tipo de pavimentos. As técnicas de conservação/reabilitação daqueles pavimentos têm também evoluído, desde a aplicação de camadas de reforço até técnicas de reciclagem de pavimentos degradados.

O objetivo do presente trabalho consiste na análise das propriedades de um novo tipo de aditivo para misturas betuminosas, as Borrachas Reagidas e Ativadas designadas na terminologia anglo-saxónica por "*Reacted and Activated Rubber*", vulgo RAR.

Nesta tese procura-se desenvolver e divulgar este novo aditivo, dando-se particular atenção às vantagens da sua aplicação na reabilitação de pavimentos degradados abordando-se vários estudos que permitem perceber o comportamento dos pavimentos com essas soluções.

A RAR modifica o betume virgem potenciando as propriedades de qualquer mistura bem dimensionada (p.e., a temperatura de amolecimento, resiliência e grau PG) permitindo obter massas muito estáveis de performance superior (fadiga, à deformação permanente).

Com a utilização de RAR pretende-se, do ponto de vista estrutural, melhorar o comportamento dos pavimentos nas vertentes da deformação permanente e da fadiga, retardando a reflexão de fendas e, na perspetiva funcional, essencialmente, reduzir o efeito de projeção de água e reduzir o fendilhamento e o ruído.

Esta tese completa-se com o dimensionamento de uma nova solução de reparação de um importante trecho piloto na RAM esperando-se que, a curto prazo, a mesma venha a ter execução o que permitirá comprovar quer a eficácia técnica da mesma quer os ganhos financeiros e ambientais.

Palavras-Chave:

Pavimentos Rodoviários Flexíveis

Reabilitação

Betume-borracha

Borracha Reagida e Ativada (RAR)

Mistura Betuminosa com Borracha

ABSTRACT

All structures, at some point in the end of their service lives, require interventions that allow them to maintain a quality level suitable for the functions that they play and road pavements are not, in this field, the exception, as they require frequent repairs which aim to restore their levels of functionality, safety, and comfort.

In Portugal, the most common type of road pavement is flexible pavement, and this is the reason why this dissertation will address only this type of pavement. The techniques of maintenance/rehabilitation of flexible pavements have also envolved, from the application of reinforcement layers to deteriorated pavements recycling techniques.

The purpose of this essay consists of the analysis of the features of the new type of additive for bituminous mixtures, the Reacted and Activated Rubber, known as RAR.

This thesis seeks to develop and disseminate this new additive, focusing mainly on the advantages of its application in the rehabilitation of degraded pavements, with resource to several studies which will allow to understand the behavior of the pavements with this kind of solutions.

RAR modifies the “virgin” bitumen, by potentiating the properties of any well-proportioned mixture (e.g., softening temperature, resiliency and PG degree) allowing to get very stable high-performance masses (fatigue to permanent deformation).

With the use of RAR it is intended, from the structural point of view, to improve pavement behavior concerning permanent deformation and fatigue, by delaying crevasses reflation and, in the functional perspective, essentially, to reduce the effects of water spraying cracking and noise.

This thesis will be completed with the design of a new solution for repairing a vital experimental road stretch in RAM, which is expected, in the short term, to be implemented, thus demonstrating both its technical effectiveness and its financial and environmental advantages.

Keywords:

Road Pavements

Rehabilitation

Bitumen- Crumb Rubber

Reacted and Activated Rubber (RAR)

Hot Mix Asphalt

Asphalt Rubber Mixes

ÍNDICE DE MATÉRIAS

CAPÍTULO 1 1
INTRODUÇÃO 1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA 2
CAPÍTULO 2 5
PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS 5
2.1. CARACTERIZAÇÃO DE UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO FLEXÍVEL 6
2.2. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS 9
2.2.1. Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários Flexíveis 9
2.2.2. Caracterização Funcional de Pavimentos Rodoviários Flexíveis 10
2.2.3. Caracterização Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis 10
2.2.4. Análise dos Resultados Obtidos 12
2.3. PRINCIPAIS DEGRADAÇÕES DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS 17
2.3.1. Deformações 19
2.3.2. Fendilhamento 19
2.3.3. Desagregação da camada de desgaste 20
2.3.4. Movimento de Materiais 21
2.4. REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS 21
2.4.1. Reabilitação das características funcionais 22
2.4.2. Reabilitação das características estruturais 23
2.5. VIDA RESTANTE DE UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO 23
2.6. DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE REFORÇOS DE PAVIMENTOS 24
2.6.1. Tráfego presente no pavimento rodoviário 24
2.6.2. Materiais betuminosos utilizados na camada de reforço 27
CAPÍTULO 3 37
MISTURA BETUMINOSA COM ADIÇÃO DE RAR 37
3.1. DESCRIÇÃO GERAL DE MISTURAS BETUMINOSAS 38
3.2. MÉTODO PROPOSTO PARA A FORMULAÇÃO DE MISTURAS DESCONTÍNUAS (I-MIX DESIGN) 40
3.2.1. Contributos do método de formulação i-Mix Design 42
3.3. CONSTITUENTES DAS MISTURAS BETUMINOSAS 43
3.3.1. Agregados 43
3.3.2. Ligantes betuminosos – betumes 45
3.4. BORRACHA REAGIDA E ATIVADA (RAR) 52
3.4.1. Desempenho de betume modificado com RAR 52

3.4.2. Desempenho das misturas betuminosas com a adição de RAR 57
3.4.3. Aspetos relacionados com a produção das misturas com RAR 61
3.4.4. Vantagens e limitações das Misturas Betuminosas com adição de RAR 62
3.5. COMPARAÇÃO ENTRE BMB E LIGANTES BETUMINOSOS COM RAR 63
3.6. ANÁLISE COMPARATIVA DOS CUSTOS DE CICLO DE VIDA 65
CAPÍTULO 4 67
REPARAÇÃO DE UM TRECHO PILOTO 67
4.1. DESCRIÇÃO DO TRECHO PILOTO PARA UMA REPARAÇÃO COM RAR 68
4.1.1. Caracterização do estado do pavimento existente 69
4.2. TRÁFEGO DE PROJETO 74
4.2.1. Projeção com base nas taxas de crescimento históricas 75
4.2.2. Projeção com base no MACOPAV 76
4.2.3. Projeção com base em analogias com a procura na VR1 77
4.3. SOLUÇÕES DE REFORÇO PARA O TRECHO PILOTO 80
4.3.1. Reabilitações estruturais estudadas 81
4.3.1.1. Características da mistura proposta com RAR. 82
4.3.2. Reforço com camada grossa ThinGap, com RAR 86
4.3.3. Reforço com camada fina de ThinGap 88
4.3.4. Reforço com solução tradicional 89
4.3.5. Reforço tradicional com betume “semi-modificado” com RAR 91
4.4. AVALIAÇÃO SUMÁRIA DO PREÇO DAS SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO SUGERIDAS 92
CAPÍTULO 5 95
CONCLUSÕES 95
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS 96
5.2. SUGESTÕES FUTURAS 100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS 101
ANEXOS 105
ANEXO I 106
CARACTERIZAÇÃO BETUME COMBINADO 106
AI.1. Propriedades do Betume 107
AI.2. Grau PG de um betume combinado – “Performance Grade” 108
ANEXO II 111
CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS 111
AII.1. Granulometrias dos agregados utilizados na mistura ThinGap com RAR 112

AII.2. Absorção de água dos agregados utilizados na mistura ThinGap com RAR 115
AII.3. Massa volúmica dos agregados utilizados na mistura ThinGap com RAR 116
ANEXO III 119
CARACTERIZAÇÃO DA THINGAP 119
AIII.1. Boletim de Marshall da nova formulação de mistura ThinGap com RAR 120
AIII.2. Boletim i-Mix para a primeira formulação da mistura ThinGap com RAR 122
AIII.3. Boletim i-Mix para a nova formulação da mistura ThinGap com RAR 123
AIII.4. Resistência à deformação permanente da ThinGap, para RAM 125
AIII.5. Resistência à derrapagem da ThinGap, para RAM 128
ANEXO IV 129
ESTUDO DE TRÁFEGO 129
ANEXO V 165
CARACTERIZAÇÃO DO PAVIMENTO 165
AV.1. Observação visual e apoio fotográfico 166
AV.2. Ensaios de carga com Deflectómetro de Impacto 180
AV.3. Plano de prospeção 187
AV.4. Determinação dos módulos de deformabilidade 198
AV.5. Desenhos representativos 203
ANEXO VI 207
REDE VIÁRIA REGIONAL 207
AVI.1. Classificação das estradas da rede viária regional 208
AVI.2. Estradas regionais principais 221
AVI.3. Concessão da VIALITORAL 223
ANEXO VII 225
ALTERAÇÃO DO NÓ RODOVIÁRIO 225
AVII.1. Pavimentação: Planta geral dos pavimentos 226
AVII.2. Pavimentação: Promenores de Pavimentação 228
ANEXO VIII 231
I-MIX DESIGN 231
AVIII.1. Metodologia de funcionamento do i-Mix Design 232
AVIII.2. Contributos do método de formulação i-Mix Design 233
ANEXO IX 235
PREÇOS DE APLICAÇÃO 235
AIX.1. Lista de preços unitários para diferentes misturas betuminosas 236

AIX.2. Lista de preços unitários para cada estudo de reabilitação 237
ANEXO X 241
PRODUÇÃO DE RUÍDO 241
AX.1. Contagem de tráfego 242
AX.2. Relatório de ruído ambiente 243

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Constituição e ações de um pavimento rodoviário flexível 7
Figura 2 - Constituição e comportamento do pavimento flexível (Branco, Pereira, & Santos, 2011) 8
Figura 3 - Deflectómetro de Impacto (FWD) e zonas de tensão (Branco, Pereira, & Santos, 2011) 11
Figura 4 - Fatores a considerar para a divisão em comportamento homogéneo (NCHRP, 2004) 13
Figura 5 – Temperatura de Projeto de camadas betuminosas 16
Figura 6 - Evolução do estado do pavimento ao longo do tempo (Estradas, 2013) 21
Figura 7 – Esquema para a ação de um eixo-padrão sobre um pavimento (Branco, Pereira, & Santos, 2011) 26
Figura 8 – Composição Volumétrica das misturas betuminosas (Branco, Pereira, & Santos, 2011) 28
Figura 9 - Extensões dos estados limites de ruína (Ribeiro, 2012) 31
Figura 10 – Exemplo do esquema de ensaio à flexão em 4 pontos (Sousa, Fonseca, Freire, & Pais, 1999) 39
Figura 11 – Partículas ativas e mastique betuminoso (Miranda H. , 2016) 41
Figura 12 – Conceitos desenvolvidos e sua interligação no método inventado por (Miranda H. , 2016) 41
Figura 13 – Representação de curvas granulométricas (Bernucci, Motta, & Ceratti, 2008) 44
Figura 14 - Destilação fracionada do petróleo bruto (Alves, n.d) 46
Figura 15 – Esquema do ensaio de penetração de betume e equipamento utilizado 48
Figura 16 – Ensaio para determinação do ponto de amolecimento 48
Figura 17 – Ensaio de resiliência e aspeto final das amostras 49
Figura 18 – Esquema e fotografia do Viscosímetro Rotacional 49
Figura 19 – Ensaios Superpave – equipamentos de testes utilizados, propósito e relação com a “performance” 50
Figura 20 - Localização das deformações em um ciclo de fluência e recuperação do ensaio MSCR 51
Figura 21 – Resposta de um ligante betuminoso a uma tensão constante aplicada num intervalo de tempo 54
Figura 22 – Avaliação do comportamento visco-elástico do ligante betuminoso (Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, 2016) 55
Figura 23 - Curva-mestra G*/sin(δ) (Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, 2016) 56
Figura 24 – Efeito da % de RAR no Grau PG de betumes combinados (Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, 2016) 56
Figura 25 – Avaliação da capacidade de recuperação de um betume combinado (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012) 57
Figura 26 – Curvas granulométricas tipo utilizadas em misturas betuminosas (Fontes, 2009) 58
Figura 27 – Curvas granulométricas, open graded, gap graded e ThinGap (Sousa, Miranda, & Silva, 2012) 58
Figura 28 - Resistência à deformação permanente de diferentes misturas (Sousa, Miranda, & Silva, 2012) 59
Figura 29 - Ensaio de avaliação de resistência à fadiga (Consulpav, 2016) 60
Figura 30 - Etapas do processo de fabrico de uma Mistura Betuminosa com RAR 61
Figura 31 - Destino dos pneus recolhidos em 2015 e principais aplicações (Valorpneu, 2015) 63
Figura 32 - Localização do trecho em estudo na rede viária envolvente 68
Figura 33 - Localização dos pontos de ensaio realizados com o Defletómetro de Impacto 71

Figura 34 - Geometria do pavimento existente e do projeto 73
Figura 35 - Esquematização do trecho, pertencente à ERº115 77
Figura 36 – Esquematização da planta das vias dos sublanços 8 e 9, ligação ao trecho 78
Figura 37 - Distribuição dos “loops” do contador do sublanço 8 no sentido crescente 79
Figura 38 - Idem do sublanço 8 no sentido decrescente 79
Figura 39 - Idem do sublanço 9 no sentido decrescente 79
Figura 40 - Idem sublanço 9 no sentido crescente 79
Figura 41 – Lajetas para ensaio de Wheel Tracking (1) 127
Figura 42 - Lajetas para ensaio de Wheel Tracking (2) 127
Figura 43 - Localização do trecho, pertencente à ERº115 131
Figura 44 – Tráfego médio diário na próxima década (dois sentidos) 135
Figura 45 – Tráfego por dia na próxima década (dois sentidos) 136
Figura 46 – Esquematização do trecho, pertencente à ERº115 137
Figura 47 – Esquematização da planta das vias dos sublanços 8 e 9, ligação ao trecho 138
Figura 48 - Distribuição dos “loops” do contador do sublanço 8 no sentido crescente 139
Figura 49 - Idem do sublanço 8 no sentido decrescente 139
Figura 50 - Idem do sublanço 9 no sentido decrescente 139
Figura 51 - Idem sublanço 9 no sentido crescente 139
Figura 52 - Esquematização das plantas da via – Deferenciação dos sentidos de tráfego 139
Figura 53 - Esquematização das plantas da via – Diferenciação dos sentidos de tráfego .. 142
Figura 54 - Esquematização das plantas da via – Diferenciação dos sentidos de tráfego .. 146
Figura 55 - Esquematização das plantas da via – Diferenciação dos sentidos de tráfego .. 150
Figura 56 – Projeção de tráfego no trecho a partir das estimativas da VTM 155
Figura 57 – Vista da ER 115, VR1-Rotunda D. Francisco Santana 166
Figura 58 – Vista da ER 115, Rotunda D. Francisco Santana-VR1 166
Figura 59 –Pele de crocodilo – Grau de severidade baixo (pk ≈ 0+240) 167
Figura 60 – Pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+240) 167
Figura 61 – Fissura longitudinal evoluindo para pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+200) 168
Figura 62 - – Fissura longitudinal– Grau de severidade médio (pk ≈ 0+150) 168
Figura 63 – Pele de crocodilo evoluindo para ninhos – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+140) 169
Figura 64 – Pele de crocodilo e depressão – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+140) 169
Figura 65 – Ninhos – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+140) 170
Figura 66 – Pele de crocodilo e depressões – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+70) 170
Figura 67 – Pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+70) 171
Figura 68 – Fissuras tranversais – Grau de severidade médio (pk ≈ 0+60) 171
Figura 69 – Fissuras transversais evoluindo para pele de crocodilo – Grau de severidade baixo (pk ≈ 0+60) 172
Figura 70 – Pele de crocodilo – Grau de severidade baixo (pk ≈ 0+55) 172
Figura 71 – Fissuras transversais – Grau de severidade baixo (pk ≈ 0+45) 173
Figura 72 – Fissuras longitodinais -Grau de severidade médio (pk ≈ 0+30) 173
Figura 73 – Desagregações superficiais – Grau de severidade baixo (pk ≈ 0+20) 174
Figura 74 – Desagregações superficiais – Grau de severidade baixo (pk ≈ 0+10) 174
Figura 75 – Pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+10) 175
Figura 76 – Pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+5) 175
Figura 77 – Pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+10) 176
Figura 78 – Pele de crocodilo – Grau de severidade médio (pk ≈ 0+20) 176
Figura 79 – Pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+30) 177
Figura 80 – Pele de crocodilo e depessão – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+40) 177
Figura 81 – Pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+50) 178
Figura 82 – Pele de crocodilo – Grau de severidade baixo (pk ≈ 0+60) 178

Figura 83 – Fissuras longitudinais evoluídas em pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+100) 179
Figura 84 – Fissuras longitudinais – Grau de severidade médio (pk ≈ 0+200) 179
Figura 85 - Equipamento FWD utilizado na caracterização estrutural do pavimento em estudo 185
Figura 86 – Foto ilustrativa do deflectómetro de impacto aplicando uma carga de 65 kN .. 186
Figura 87 - Foto ilustrativa do deflectómetro de impacto em andamento 186
Figura 88 – Carotes retirados das sondagensa à rotação elaboradas no troço auscultado 196
Figura 89 – Determinação da espessura das camadas dos carotes designados por SR1 e SR2 196
Figura 90 - Determinação da espessura das camadas dos carotes designados por SR3 e SR4 197
Figura 91 – Determinação da percentagem de betume em cada carote retirado 197
Figura 92 – Estradas Regionais Principais e Complementares..... 222
Figura 93 – Concessão da VIALITORAL - Via Rápida (VR1)..... 224
Figura 94 - Método de formulação e de controlo de qualidade de uma misturas betuminosa descontínua tipo SMA..... 232

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (Branco, Pereira, & Santos, 2011) 7
Tabela 2 - Influência das características funcionais dos pavimentos rodoviários (OCDE, 1987) 10
Tabela 3 - Módulos de Deformabilidade usuais para a camadas de pavimentos (EP-JAE, 1995) 15
Tabela 4 - Familias e Tipos de Degradações (Teng, 2003) 18
Tabela 5 - Fator de agressividade do tráfego ((JAE), 1995) 25
Tabela 6 - Classes de tráfego (Branco, Pereira, & Santos, 2011) 25
Tabela 7 - Fatores que influênciam a resistência à deformação permanente (Sousa, Craus, & Monismith, 1991) 32
Tabela 8 - Definição da sequência de propriedades do pavimento 34
Tabela 9 - Coeficientes estáticos 35
Tabela 10 – Exigências para a avaliação da resistência à fadiga de uma mistura betuminosa (EN 12697-24) 39
Tabela 11 – Valores mínimos exigidos aos agregados das misturas betuminosas a quente para camadas de desgaste (CEEP, 2014) e NP EN 13043 45
Tabela 12 – Propriedades e métodos de ensaio dos betumes (CEEP, 2014) 47
Tabela 13 - Espessura camada betuminosa (Caltrans, 1992) 61
Tabela 14 – Custos de produção de misturas betuminosas em €, e custos de aplicação em m^2 66
Tabela 15 – Análise das deflexões caracteristicas segundo (Anexo AV.2) 71
Tabela 16 - Locais onde se efetuaram sondagens à rotação 71
Tabela 17 – Espessura e natureza das camadas identificadas nas carotes recolhidas no trecho piloto 72
Tabela 18 – Módulos de deformabilidade do pavimento em estudo 73
Tabela 19 – Determinação da temperatura de projeto 74
Tabela 20 – Módulos de deformabilidade das camadas betuminosas para a temperatura de projeto 74
Tabela 21 - Contagem com auxilio de uma filmagem, 23/01/2017 75
Tabela 22 - Contagem da CMF, 21/05/2015 e estimativa de tráfego 75
Tabela 23 - Variação do tráfego passado ao longo dos anos 75
Tabela 24 - Fluxo de tráfego no trecho para um periodo de dimensionamento de 10 anos . 76
Tabela 25 - Fluxo de tráfego no trecho para um periodo de dimensionamento de 10 anos . 76
Tabela 26 – Modelo selecionado de regressão múltipla para o trecho piloto 79
Tabela 27 - Evolução do tráfego com base nas estimativas VTM, segundo Modelo 4 80
Tabela 28 – Projeção de tráfego para 2027 80
Tabela 29 - Requisitos mínimos exigidos à mistura betuminosa ThinGap com RAR 82
Tabela 30 - Agregados a utilizar na mistura betuminosa ThinGap com RAR 82
Tabela 31 - Curva granulométrica definida pelo i-Mix Design 82
Tabela 32 - Resultados do betume combinado, com diferentes % RAR 83
Tabela 33 - Resultados do Grau PG para 0, 20, 25, 30 e 35% de RAR 83
Tabela 34 - Resultados dos ensaios MSCR 83
Tabela 35 - Características do ligante betuminoso utilizado na mistura betuminosa 84
Tabela 36 - Resultado do ensaios de Wheel Tracking 84
Tabela 37 - Resumo dos resultados obtidos com o ensaio à fadiga da mistura betuminosa ThinGap 85
Tabela 38 - Características típicas da resistência à derrapagem de misturas convencionais e com BMB 85

Tabela 39 - Resultados do ensaio à sensibilidade à água da mistura betuminosa desenvolvida para a RAM 85
Tabela 40 - Resistência à desagregação da mistura ThinGap, formulada para a RAM..... 86
Tabela 41 - Características da mistura betuminosa ThinGap com RAR considerada 86
Tabela 42 - Caracterização do projeto proposto para a reabilitação do pavimento em ThinGap com RAR 86
Tabela 43 - Caracterização do projeto proposto para a reabilitação do pavimento em ThinGap com RAR 88
Tabela 44 – Características da mistura betuminosa Betão Betuminoso..... 89
Tabela 45 – Caracterização do projeto proposto para a reabilitação do pavimento em Betão Betuminoso..... 90
Tabela 46 - Tabela resumo dos preços comparativos à solução tradicional das diferentes soluções 93
Tabela 47 – Limites globais do fuso granulométrico da mistura betuminosa ThinGap com RAR para a Madeira..... 97
Tabela 48 – Resumo Grau PG do betume combinado estudado 108
Tabela 49 - Resultados do Grau PG segundo a EREFA (RFTO)..... 108
Tabela 50 - Resultados do Grau PG segundo CEP (PAV)..... 109
Tabela 51 - Resultados do ensaios MSCR 109
Tabela 52 – “Performance Grade” - Grau PG para betumes convencionais 110
Tabela 53 – Resistência à derrapagem da mistura ThinGap com RAR desenvolvida para a RAM (PVT) 128
Tabela 54 – Tráfego Médio Diário, segundo EXACTO..... 132
Tabela 55 – Contagem de tráfego para a ERº115 num período das 07h às 20h, segundo CMF 132
Tabela 56 – Contagem de tráfego que circula no trecho, com recurso a gravação de vídeo 132
Tabela 57 - Contagem com auxilio de uma filmagem, 23/01/2017..... 133
Tabela 58 - Contagem da CMF, 21/05/2015 e estimativa de tráfego 133
Tabela 59 – Variação do tráfego passado ao longo dos anos..... 133
Tabela 60 – Fluxo de tráfego no trecho para um periodo de dimensionamento de 10 anos 134
Tabela 61 – Fluxo de tráfego no trecho para um periodo de dimensionamento de 10 anos 135
Tabela 62 – Dados horários do tráfego do trecho e dos sublanços 8 e 9..... 140
Tabela 63 – Tráfego nos dois sentidos em 23/01/2017..... 140
Tabela 64 – Índices de ajustamento do modelo..... 141
Tabela 65 – Modelo de regressão múltipla para o tráfego total no trecho (Modelo 1) 141
Tabela 66 - Dados horários do tráfego do trecho e dos sublanços 8 e 9, para cada sentido 143
Tabela 67 - Tráfego no sentido descendente em 23/01/2017 144
Tabela 68 - Índices de ajustamento do modelo..... 144
Tabela 69 – Modelo de regressão múltipla para o tráfego descendente no trecho (Modelo 2) 144
Tabela 70 - Tráfego no sentido ascendente em 23/01/2017 145
Tabela 71 - Índices de ajustamento do modelo..... 145
Tabela 72 – Modelo de regressão múltipla para o tráfego ascendente no trecho (Modelo 2) 145
Tabela 73 - Dados horários do tráfego do trecho e dos sublanços 8 e 9, para cada sentido 147
Tabela 74 - Tráfego no sentido descendente em 23/01/2017 148
Tabela 75 - Índices de ajustamento do modelo..... 148

Tabela 76 – Modelo de regressão múltipla para o tráfego descendente no trecho (Modelo 3) 148
Tabela 77 – Tráfego no sentido ascendente em 23/01/2017 149
Tabela 78 - Índices de ajustamento do modelo 149
Tabela 79 – Modelo de regressão múltipla para o tráfego ascendente no trecho (Modelo 3) 149
Tabela 80 - Dados horários do tráfego do trecho e dos sublanços 8 e 9, para cada sentido 151
Tabela 81 - Tráfego no sentido descendente em 23/01/2017 152
Tabela 82 - Índices de ajustamento do modelo 152
Tabela 83 – Modelo de regressão múltipla para o tráfego descendente no trecho (Modelo 4) 152
Tabela 84 - Tráfego no sentido ascendente em 23/01/2017 153
Tabela 85 - Índices de ajustamento do modelo 153
Tabela 86 – Modelo de regressão múltipla para o tráfego ascendente no trecho (Modelo 4) 153
Tabela 87 – Contribuições das vias no sublanço 8 154
Tabela 88 - Contribuições das vias no sublanço 9 154
Tabela 89 - Evolução do tráfego com base nas estimativas VTM, segundo Modelo 4 155
Tabela 90 – Projeção de tráfego para 2027 156
Tabela 91 – TMDA das Vias do Sublanço 8 em 2008 157
Tabela 92 - TMDA das Vias do Sublanço 9 em 2008 157
Tabela 93 - TMDA das Vias do Sublanço 8 em 2009 158
Tabela 94 - TMDA das Vias do Sublanço 9 em 2009 158
Tabela 95 - TMDA das Vias do Sublanço 8 em 2010 159
Tabela 96 - TMDA das Vias do Sublanço 9 em 2010 159
Tabela 97 - TMDA das Vias do Sublanço 8 em 2011 160
Tabela 98 - TMDA das Vias do Sublanço 9 em 2011 160
Tabela 99 - TMDA das Vias do Sublanço 8 em 2015 161
Tabela 100 - TMDA das Vias do Sublanço 9 em 2015 161
Tabela 101 – TMDA na consessão da VIALITORAL em anos passados 162
Tabela 102 – Deflexões in situ registadas no trecho auscultado, sentido ascendente 181
Tabela 103 - Deflexões in situ registadas no trecho auscultado, sentido descendente 182
Tabela 104 – Análise das deflexões obtidas – sentido ascendente 183
Tabela 105 - Análise das deflexões obtidas – sentido descendente 184
Tabela 106 - Análise comparativa de contributo relativamente aos métodos de formulação convencionais 233
Tabela 107 - Análise comparativa de contributo relativamente aos métodos de formulação convencionais (continuação) 234
Tabela 108 – Contagem de tráfego para aferir a produção de ruído no trecho piloto 242

LISTA DE SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

SIMBOLOGIA

ASTM	*American Society for Testing and Materials* ou ASTM *International*
C	Coeficiente de crescimento do fluxo de tráfego
cm	Centímetros
C_{med}	Força máxima registada quando registada a deflexão no sensor i
D	Dano, %
d_k	Deflexão característica
D_i^{norm}	Deflexão no sensor i, normalizada para uma carga padrão
D_i^{med}	Deflexão medida no sensor
D_{10}	Diâmetro do agregado correspondente a 10% de passados
D_{30}	Diâmetro do agregado correspondente a 30% de passados
E	Módulo de deformabilidade
E_m	Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa
EN	Norma Europeia
ε_t	Extensão horizontal em camadas estabilizadas com ligantes
ε_z	Extensão vertical em camadas de pavimento e fundação
FAF	Coeficiente corretivo para o ajuste "*in situ*"
IR	Temperatura à superfície
kN	QuiloNewton
MPa	MegaPascal
m	Média
mm	Milímetros
N_a	Número acumulado de eixos padrão admissível
N_p	Número acumulado de eixos padrão que solicitam o pavimento
NLT	Norma Espanhola
NP	Norma Portuguesa
PC	Percentagem de fendilhamento
PRN	Plano Rodoviário Nacional
$P_{85\%}$	Percentil 85
r	Raio da superfície circular
RCT	Temperatura de ocorrência de Reflexão de Fendas
RPA	*Rubber Pavement Association*

s	Desvio Padrão
SMA	*Stone Mastic Asphalt*
TAF	Coeficiente de correção para a temperatura
TVB	Teor volumétrico de betume, %
T_d	Temperatura do Pavimento em Profundidade
T_{24H}	Temperatura média do ar no dia anterior
σ	Tensão
σ_t	Tensão horizontal em camadas estabilizadas com ligantes
σ_z	Tensão vertical de compressão em camadas de pavimentos e fundação
ν	Coeficiente de Poisson
Z_i	Soma acumulada dos desvios da média ao ponto de ensaio i

ABREVIATURAS

AB	Argamassa Betuminosa
AAF	Coeficiente relacionado com o envelhecimento das misturas betuminosas
AASHTO	*American Association of State Highway and Transportation Officials*
AGEC	Agregado de granulometria extensa estabilizado com cimento
AR	*Asphalt Rubber*
ASFT	*Airport Surface Friction Tester*
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
BC	Betão de Cimento
BD	Betão Betuminoso
BG	Base Granular
BISAR	*Bitumen Stress Analysis*
BMB	Betume Modificado com Borracha
BP	Betão Pobre
Caltrans	*California Department of Transportation*
CAT	Coeficiente de Atrito Transversal
CEEP	Caderno de Encargos da Estradas de Portugal
DSR	Dynamic Shear Rheometer
EN	Norma Europeia
EP	Estradas de Portugal
FHWA	*Federal Highway Administration*
FWD	*Falling Weight Deflectometer*
HMA	*Hot Mix Asphalt*
InIR	Instituto de Infraestruturas Rodoviárias
IRC	Índice de Resistência Conservada
ISO	*International Organization for Standardization*
JAE	Junta Autónoma das Estradas
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LPS	*Laser Profiler System multi-function*
MACOPAV	Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Portuguesa
MAM	Mistura de Alto Módulo
MB	Macadame Betuminoso

MBD	Mistura Betuminosa Densa
RAR	Reacted and Activated Rubber
RMS	*Root Mean Square*
SAMI	*Stress Absorving Membrane Interlayer*
SbG	Sub-base Granular em material britado
SC	Solo-Cimento
SHPR	*Strategic Highway Research Program*
TMDA	Tráfego Médio Diário Anual

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

As estradas concebidas com betume convencional, têm vindo a deparar-se, por todo o mundo, com significativas degradações em prazos curtos devido a escassa manutenção, a acréscimo do movimento de tráfego ou a condições ambientais hostis.

O repetido contacto pneu/pavimento e a permanente mutabilidade das condições ambientais (p.e., temperatura, humidade, exposição aos raios ultravioleta, etc.) são os principais fatores agressivos na vida residual do pavimento rodoviário. O aparecimento de fissuras, deformações, perda de características refletoras, de aderência e de materiais constituintes são problemas que perigam as condições de segurança, conforto e economia pressupostas à circulação dos utentes.

Apesar dos esforços para aumentar a vida útil dos pavimentos e para obviar a eventuais insuficiências no acesso a matérias-primas, grandes problemas decorrem das limitações orçamentais para a construção e conservação dos pavimentos rodoviários estando-se, em consequência, a fazer esforços extraordinários para que se cheguem a novas técnicas e soluções.

As novas técnicas investigadas têm que proporcionar uma relação custo-benefício mais favorável para as intervenções que, sem prejudicar as capacidades resistentes do pavimento, ampliem quer a funcionalidade, conforto e segurança da circulação quer os indicadores ambientais (p.e., a reciclagem ou a redução de ruído).

É neste contexto que surge este trabalho, no qual é abordado uma técnica de uso de borracha reciclada de pneus na reabilitação de pavimentos rodoviários que ainda é de reduzida aplicabilidade em Portugal nunca tendo sido aplicada na Região Autónoma da Madeira.

Existem diversas técnicas de reabilitação de pavimentos rodoviários, embora a que tem vindo a ser mais utilizada no nosso país consista em betumes modificados com borracha, devido a estes proporcionarem um acréscimo significativo das propriedades estruturais e funcionais das misturas betuminosas relativamente aos betumes convencionais.

Porém, apesar dos benefícios que os betumes modificados com borracha trazem às misturas betuminosas, as dificuldades de aplicação que acarretam (p.e., modificações à central, armazenamento, viscosidade, etc.) levaram a algumas resistências na adesão aos mesmos.

Tendo em conta os incrementos qualitativos que os betumes modificados com borracha oferecem, tentou-se superar as suas principais desvantagens, encontrando uma solução de ligantes betuminosos, modificados com borrachas reagidas e ativadas designadas na terminologia anglo-saxónica por "*Reacted and Activated Rubber*", vulgo RAR e assim adiante designadas.

1.2. OBJETIVOS

Os pavimentos rodoviários flexíveis são uma estrutura de camadas horizontais sobrepostas ligadas, que têm como principal função resistir às ações impostas pelos veículos, transmitindo-as de forma compatível, inferiormente, à base, sub-base e fundação e disponibilizando, superiormente, uma superfície confortável, regular e segura para a circulação rodoviária.

Esta definição engloba uma grande variedade de estruturas rodoviárias para as quais, em muitos casos, o betume é um componente essencial, que lhe confere importantes características, daí a designação de “pavimentos betuminosos” adotada para os pavimentos que incluem misturas betuminosas.

Para incrementar as características mecânicas do betume convencional começaram por adicionar-se plastómeros ou elastómeros evoluindo-se para betumes modificados com borracha (BMB).

A utilização em Portugal de betumes modificados com RAR é algo recente, cenário esse que se pode alterar caso as propriedades do produto e os relatórios sobre o desempenho das misturas assim obtidas ganhe divulgação e adesão.

Considerando as necessidades de pavimentação das estradas em todo o País, a atual dissertação tem como objetivos:

- estabelecer uma comparação dos custos de ciclo de vida (“*live cycle cost*”) de um pavimento para distintos tipos de misturas;
- a análise dos estados de ruína (fadiga e deformação permanente) de diferentes estruturas com pavimentos de misturas betuminosas tradicionais e com borracha;
- expandir os conhecimentos, explorando as potencialidades da RAR na reabilitação de pavimentos rodoviários.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação é constituída por 5 capítulos, que se resumem da seguinte forma:

O **capítulo 1** contém o enquadramento e os objetivos principais do trabalho.

O **capítulo 2** apresenta uma síntese do estado da arte respeitante à reabilitação de pavimentos flexíveis, nomeadamente, dos mecanismos de degradação, famílias de degradações, avaliação da capacidade de carga dos pavimentos e metodologia utilizada no dimensionamento do reforço de pavimentos, analisando-se também diferentes técnicas de reforço de pavimentos flexíveis.

No **capítulo 3**, faz-se referência às características das misturas betuminosas em geral, fazendo-se uma descrição dos seus componentes, os betumes e os agregados. Em primeiro lugar, é identificado o principal método de formulação de misturas betuminosas, assim como as suas principais propriedades. Depois, é feita referência às misturas betuminosas com RAR abordando os respetivos constituintes e os aspetos logísticos da sua aplicação. Ainda neste capítulo, é feita uma comparação entre as misturas betuminosas com BMB e com RAR. Por fim, são estudados os custos de ciclo de vida deste tipo de misturas betuminosas.

No **capítulo 4**, apresenta-se, em primeiro lugar, um estudo de formulação de uma mistura betuminosa, designada por ThinGap com RAR descrevendo-se os ensaios de caracterização dos materiais seguindo as diretrizes no Caderno de Encargos Tipo da Estradas de Portugal (CEEP) e os ensaios de caracterização mecânica da mistura betuminosa ThinGap. Depois, é apresentado um caso de estudo, no qual é efetuada uma análise de duas soluções possíveis para a reabilitação estrutural de um pavimento de um trecho experimental numa importante estrada regional da RAM.

No **capítulo 5**, apresentam-se as conclusões da dissertação e indicam-se diretrizes para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS

2.1. CARACTERIZAÇÃO DE UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO FLEXÍVEL

A principal função dos pavimentos rodoviários flexíveis é garantir uma superfície na qual os veículos possam circular com comodidade e segurança, durante um determinado período de tempo, sob a presença das ações de tráfego e climatéricas que possam vir a ocorrer (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Os pavimentos rodoviários flexíveis são uma estrutura de camadas horizontais sobrepostas ligadas, que têm como principal função resistir às ações impostas pelos veículos, transmitindo-as de forma compatível, inferiormente, à base, sub-base e fundação e disponibilizando, superiormente, uma superfície confortável, regular e segura para a circulação rodoviária.

Na conceção deste tipo de pavimento rodoviário, devem ser acauteladas duas qualidades: a qualidade funcional, dependente da textura e acabamento das camadas superiores do pavimento para que proporcione conforto e segurança à circulação rodoviária e, também, a qualidade estrutural decorrente dos materiais e espessuras empregues na construção das camadas, para poder resistir às ações dos veículos sem se deformar excessivamente nem perder capacidade de recuperação.

Os pavimentos são, grosso modo, formados por duas grandes camadas ilustradas na Figura 1 tendo, na parte superior, as camadas ligadas, estratos estabilizados com ligantes hidrocarbonatos, e, na parte inferior, as camadas granulares (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Qualquer pavimento é solicitado por uma infinidade de combinação de ações, muito especialmente devidas ao tráfego pesado, traduzido pelas cargas dos rodados, e às ações climáticas, traduzidas pelas variações de temperatura e água, como ilustra a Figura 1.

As camadas de um pavimento rodoviário no que concerne à qualidade, resistência e preço, decrescem no sentido da superfície para a fundação, em correspondência com a diminuição de esforços em profundidade. Essas camadas são: camada de desgaste, camada de ligação, camada de base, camada de sub-base e a fundação.

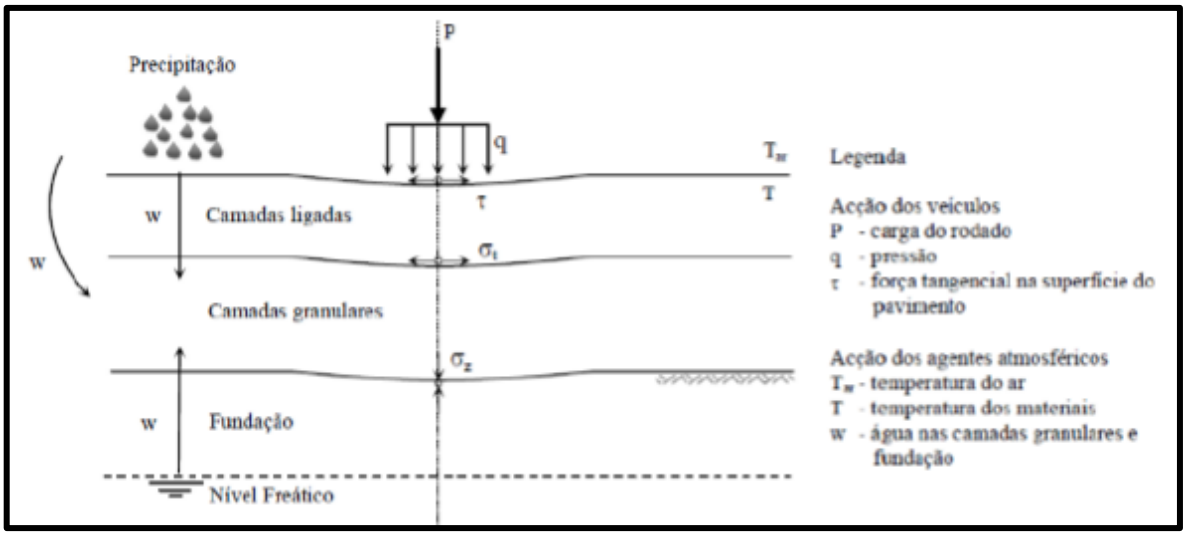


Figura 1 - Constituição e ações de um pavimento rodoviário flexível

A camada de desgaste tem como principal função assegurar o conforto e segurança da circulação, defendendo também o pavimento, em primeira linha, das águas precipitadas sobre o mesmo. Já, a camada de ligação (de regularização e a de base betuminosa) tem um papel funcional e estrutural, suportando a camada de desgaste. A camada de base granular tem um papel estrutural de distribuição e redução das tensões sobre a sub-base que, depois, as retransmite à fundação. A camada de sub-base não só assegura o apoio da base e das restantes camadas suprajacentes, como desempenha funções drenantes/anti-contaminantes. A camada de sub-base protege também a fundação do tráfego da obra durante a construção podendo, nas soluções menos exigentes, ser subtraída e substituída pelo tratamento "*in situ*" dos solos de fundação.

A forma como se podem associar camadas constituídas por distintos tipos de materiais, dá origem a vários tipos de pavimentos, que apresentam comportamentos desiguais, quando submetidos a veículos de diferentes cargas e diferentes condições climáticas.

Os pavimentos podem ser divididos em três tipos: pavimentos flexíveis, rígidos e os semirrígidos, dependendo dos materiais utilizados e da deformabilidade dos mesmos.

Na Tabela 1, indicam-se os materiais e o nível de deformabilidade para cada um dos três tipos de pavimentos.

Tipo de Pavimento	Materiais	Deformabilidade
Flexível	Hidrocarbonetos e granulares	Elevada
Rígido	Hidráulicos e granulares	Muito reduzida
Semirrígido	Hidrocarbonetos, hidráulicos e granulares	Reduzida

Tabela 1 - Pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (Branco, Pereira, & Santos, 2011)

Os pavimentos flexíveis têm uma grande diversidade no que concerne à sua constituição, dependendo do tráfego, da resistência do solo de fundação e das características e comportamentos dos materiais disponíveis, os quais, por sua vez, dependem das condições climáticas.

As camadas superiores são constituídas por misturas betuminosas compactadas sob as quais se dispõem uma ou duas camadas de materiais granulares. A deformabilidade deste tipo de pavimento é mais elevada, apresentando valores de deformação entre 250 e 500 μm (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Nas figuras seguintes são apresentadas duas, de entre as muitas, estruturas de pavimento rodoviário propostas pelo Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional, da Junta Autónoma de Estradas ((JAE), 1995).

Na Figura 2 são apresentadas duas estruturas de pavimento rodoviário flexível, das quais, à esquerda, destina-se a um tráfego reduzido e contém uma fundação de elevada capacidade de suporte. Já a estrutura de pavimento flexível, à direita, é destinada a um tráfego mais intenso e considerando uma fundação de reduzida capacidade de suporte.

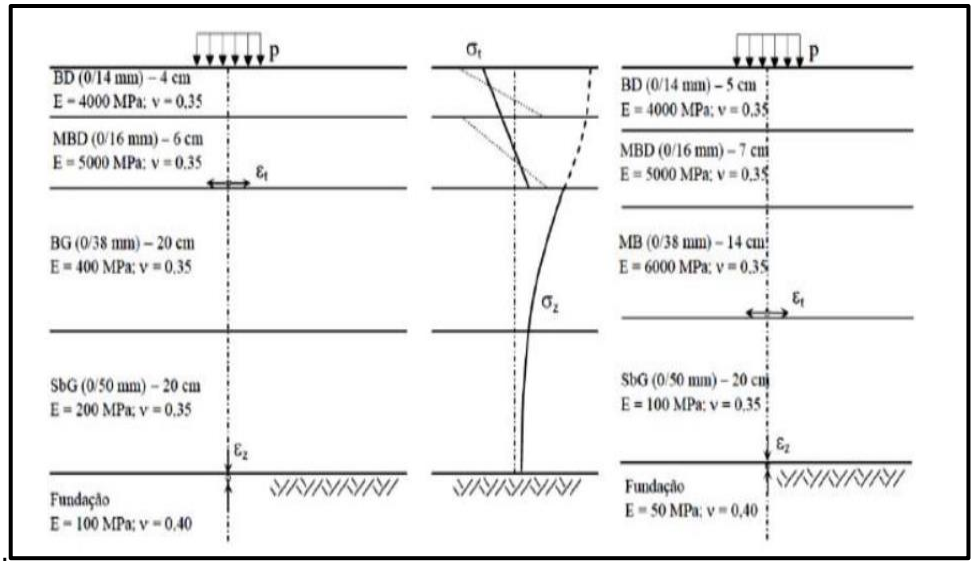


Figura 2 - Constituição e comportamento do pavimento flexível (Branco, Pereira, & Santos, 2011)

Na Figura 2, representam-se as tensões instaladas em todo o pavimento, tendo em consideração as camadas betuminosas “coladas” (traço contínuo) ou “descoladas” (traço descontínuo).

Pode-se verificar que, quando as camadas betuminosas se encontram “descoladas” entre si, estão sujeitas a um estado de tensão mais severo e degradante. Ocorrem tensões máximas de compressão na face superior e tensões de tração máximas na face inferior das duas camadas betuminosas.

No caso de as camadas funcionarem como uma só, procura-se obter camadas betuminosas “coladas” entre si, ou seja, estas, na transição, atuam em conjunto como se fossem uma única camada e as tensões evoluem de uma tensão de compressão, na face superior do pavimento, para uma tensão de tração, na face inferior da camada, em contacto com a base.

As camadas superiores estão, frequentemente, sujeitas à flexão. Para proporcionar capacidade de suporte são colocadas camadas betuminosas, pois apresentam melhor resposta a todo o tipo de esforços (compressão, tração e corte).

As camadas granulares são concebidas para suportar esforços de compressão, sendo máximos à superfície e reduzindo-se em profundidade. É de ter em conta que tais camadas não têm capacidade para resistir a esforços de tração.

2.2. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS

As degradações num pavimento são contínuas, iniciando-se, em rigor, logo que o mesmo passa a estar sujeito às ações do tráfego e às condições climáticas, mas que se aceleram com a proximidade do fim da sua vida útil. A natureza e o ritmo da evolução das patologias de um pavimento, estruturais e/ou funcionais, indiciam a sua conformidade para com o projetado.

A fim de manter a qualidade de um pavimento, durante toda a sua vida útil, o comportamento deve ser acompanhado, logo após a sua abertura ao tráfego. Deve-se, então, proceder à observação do estado e à realização de ensaios que permitam avaliar a qualidade funcional e estrutural do pavimento (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Uma cuidada observação do estado do pavimento deve ser acompanhada *pari passu* pela adequada recolha de dados do mesmo, cuja análise permita a sua adequada caracterização, segundo critérios coerentes de avaliação da qualidade (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Os processos de avaliação da qualidade dos pavimentos baseiam-se na definição de critérios que têm em conta a análise da interação entre o estado do pavimento e o utente na estrada. Segundo (Oliveira, Pereira, & Santos, 1999), tal processo é definido por duas fases:

- a observação de pavimentos, também, designada por campanhas de auscultação e inspeções visuais (caracterização das características superficiais, funcionais e estruturais do pavimento existente);
- o tratamento de dados obtidos.

2.2.1. Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários Flexíveis

A caracterização superficial dos pavimentos relaciona-se com a observação de degradações superficiais que o pavimento possa apresentar, guiando-se a avaliação, essencialmente, por uma observação visual que regista o estado de degradação aparente do pavimento, e/ou por observação de equipamento videográfico (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Nos últimos anos, a observação visual com suporte em papel, passou a ser acompanhada de registos informáticos, oferecendo assim descrições mais precisas e detalhadas, devendo conter as seguintes informações (Branco, Pereira, & Santos, 2011):

- Descrição das degradações que o pavimento apresenta;
- Descrição do nível de gravidade das respetivas patologias;
- Fotografias das degradações.

O objetivo desta caracterização é determinar índices que traduzam determinadas características funcionais e/ou estruturais dos pavimentos.

Sendo frequente encontrarmos diferentes designações para as mesmas degradações de pavimentos, foi adotada na elaboração desta dissertação as definidas pelo Manual de Patologias "*Distress Identification Manual*" (Teng, 2003).

2.2.2. Caracterização Funcional de Pavimentos Rodoviários Flexíveis

A avaliação funcional que aparenta um pavimento rodoviário está correlacionada com as exigências dos utentes que circulam na estrada, ou seja, com o conforto e a segurança de circulação (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Essas exigências estão relacionadas às características superficiais que o pavimento rodoviário apresenta, como a regularidade, condições de drenagem superficiais e resistência à derrapagem (Azevedo, 2001).

A Tabela 2 representa a influência das características funcionais dos pavimentos rodoviários flexíveis no conforto e segurança dos utentes.

Exigências					
Fatores de Influência		**Segurança**	**Comodidade**	**Ambiente**	**Economia**
Aderência		5	1	1	1
Regularidade	**Longitudinal**	3	5	1	2
	Transversal	4	2	1	1
Resistência ao Rolamento		1	1	1	2
Ruído de contacto pneu/pavimento		1	4	5	1
Características Refletoras		3	3	1	3
1-Influência nula; 2-Influência pequena; 3-Influência moderada; 4-Influência marcante; 5-Influência grande.					

Tabela 2 - Influência das características funcionais dos pavimentos rodoviários (OCDE, 1987)

Existe uma extensa gama de equipamentos associados à avaliação das características funcionais de um pavimento rodoviário flexível, como:

- *Airport Surface Friction Tester* (ASFT) – Coeficiente de Atrito;
- Pêndulo Britânico (PVT) – Coeficiente de atrito pontual médio;
- *Laser Profiler System multi-function* – Índice de Irregularidade (IRI) e Profundidade de Textura (PT).

2.2.3. Caracterização Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis

A avaliação da capacidade de carga de um pavimento é feita através do estudo das deflexões que são o melhor indicador conhecido da capacidade estrutural.

A medida das deflexões na superfície dos pavimentos submetidos a um carregamento permite, por um processo de retroanálise, estabelecer um modelo de comportamento estrutural que reproduz, próximo da realidade, as condições da ação do tráfego. As deformações reversíveis identificadas por essa forma permitem também a identificação da contribuição de cada camada para o comportamento estrutural do pavimento, obtendo-se assim os módulos de deformabilidade característicos de cada camada do pavimento.

Com o passar do tempo e do tráfego e sujeição às condições ambientais (temperatura, água, insolação) a capacidade de carga de um pavimento piora, mas não tem um comportamento uniforme oscilando em torno de linhas de tendência.

Daí que os ensaios para a avaliação da capacidade de carga em pavimentos rodoviários flexíveis não devam ser efetuados nos períodos mais desfavoráveis, ou seja, na época em que a fundação apresente mais humidade, por o pavimento ir apresentar maior deformabilidade (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Perante pavimentos flexíveis de grande espessura betuminosa, deve-se prestar maior atenção ao seu estado de rigidez. No verão, com temperaturas elevadas, as misturas betuminosas apresentam deflexões superiores devido à redução da respetiva rigidez e, no inverno, com menores temperaturas, apresentam-se mais rígidas e com menores deflexões.

A temperatura de projeto é normalmente diferenciada da temperatura a que se avaliou a capacidade de carga do pavimento, tornando-se assim necessário efetuar correções. Desta forma, existem duas maneiras de realizar o ajuste associado à temperatura: sendo uma através da execução da correção da deflexão máxima obtida nos ensaios de cargas e a outra, através da correção dos módulos de deformabilidade.

2.2.2.1. Defletómetro de Impacto

O Defletómetro de Impacto *Falling Weight Deflectometer* (FWD) é um equipamento que visa avaliar a capacidade estrutural de um pavimento através da medição da sua resposta a uma carga de impacto, podendo atingir valores entre 30 e 240 kN (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

O aparelho propriamente dito está atrelado a um veículo ligeiro, sendo este que contém o equipamento informático de controlo do ensaio que trata e restitui a informação obtida.

O equipamento é formado por um sistema mecânico comportando um eixo vertical, onde se desloca uma massa por toda a extensão, que, na base, contém um conjunto de amortecedores que, por sua vez, transmitem ao pavimento a carga resultante da queda da massa de uma placa com 300 ou 400 mm de diâmetro (Anexo: A.V.2).

Os acelerómetros que o equipamento contém, têm o intuito de medir a resposta da superfície do pavimento e estão localizados a determinadas distâncias do centro de aplicação da carga. Tais sensores de deflexão podem ter diferentes afastamentos, conforme a rigidez do pavimento. No entanto, para situações comuns (InIR, 2009), os sensores deverão ficar localizados relativamente ao centro da carga, nas seguintes posições: 0; 300, 450, 600, 1500, 1800, 2100 mm.

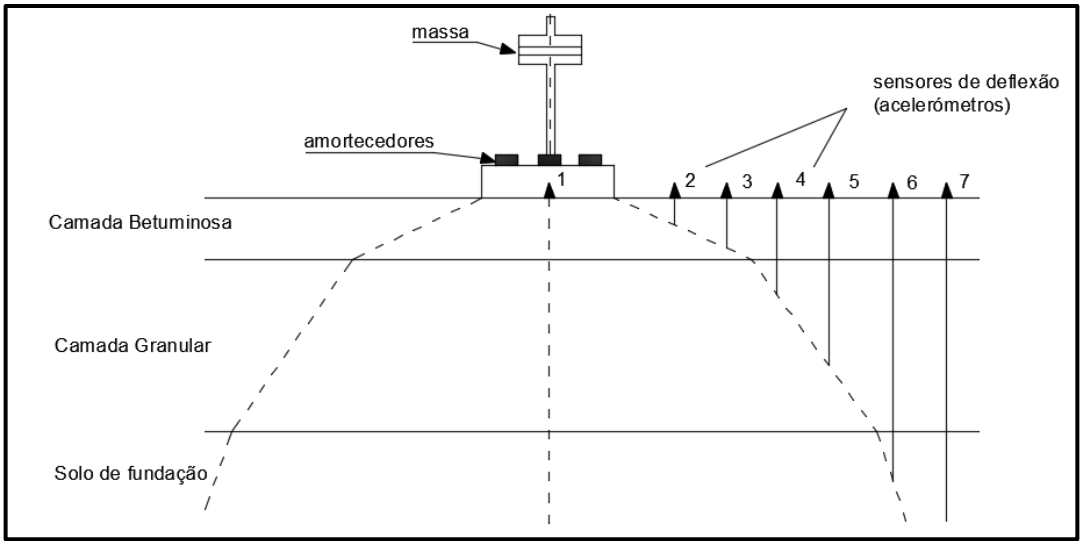


Figura 3 - Deflectómetro de Impacto (FWD) e zonas de tensão (Branco, Pereira, & Santos, 2011)

O ensaio realiza-se quando a massa cai a determinada distância sobre os amortecedores, transmitindo assim uma força ao pavimento, simultaneamente são medidos os deslocamentos verticais da superfície nos pontos de apoio dos acelerómetros.

A observação dos pavimentos com o Defletómetro de Impacto realiza-se por amostragem, podendo variar o seu espaçamento conforme a homogeneidade da capacidade estrutural do pavimento. O espaçamento habitual entre auscultações consecutivas varia de 50 a 100 m.

Note-se que os resultados do Defletómetro de Impacto podem nem sempre representar adequadamente a realidade. Com efeito, o equipamento pode apresentar variações de força aplicada, resultado da existência de atrito no sistema vertical a que se desloca a massa, da variação da deformabilidade dos amortecedores com a temperatura ou das características de deformabilidade do pavimento ensaiado.

Tendo em vista minimizar tais variações da força, é necessário normalizar as deflexões medidas através da seguinte expressão (InIR, 2009):

$$Di^{norm} = \frac{Di^{med} \times Cp}{C_{med}} \quad (1)$$

Sendo:

D_i^{norm} - Deflexão no sensor i, normalizada para a carga padrão C_p;
D_i^{med} - Deflexão medida no sensor;
C_{med} – Força máxima registada na célula de carga quando registada a deflexão no sensor i, em kN.

O equipamento também regista a temperatura da superfície do pavimento que, como já referimos, é fundamental a uma boa análise dos resultados (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

2.2.4. Análise dos Resultados Obtidos

A análise à capacidade de carga de um pavimento rodoviário permite classificá-lo estruturalmente. Após a sua auscultação é necessário proceder-se a um estudo dos dados obtidos, nomeadamente das deflexões para os diferentes pontos de ensaio.

Para estabelecer uma análise que possa enquadrar os resultados obtidos com a realidade comportamental do pavimento, é necessário destacar quatro etapas: a divisão em zonas de comportamento estrutural homogéneo; o cálculo da deflexão característica; a caracterização mecânica do pavimento existente; e a correção do módulo de deformabilidade para a temperatura de projeto.

2.2.4.1. Divisão em Zonas de Comportamento Estrutural Homogéneo

A divisão dos troços em estudo em subseções homogéneas é indispensável para se proceder a uma avaliação da capacidade de carga de um pavimento rodoviário (Pinelo, 1993).

A avaliação estrutural de pavimentos rodoviários é realizada, normalmente, em troços de longa extensão por, no processo de avaliação estrutural de pavimentos haver necessidade de se identificarem secções homogéneas para programação das ações de manutenção. Nesse contexto, uma das grandes dificuldades nos cálculos dos módulos, através da retroanálise, está na escolha da bacia a ser utilizada que, por vezes, apresenta grande heterogeneidade.

As variações das deflexões máximas obtidas são importantes para a divisão de um pavimento em subseções homogéneas, uma vez que estas deflexões fornecem a resposta do conjunto pavimento-fundação quando carregado (Jacinto, Ribeiro, & Azevedo, 2006).

Na forma de homogeneizar o troço em estudo, deve-se considerar os seguintes parâmetros: tipo de pavimento; data de construção e das obras de conservação; constituição do pavimento (secção transversal); classe de tráfego; e tipo de solo de fundação.

Normalmente os dados referidos anteriormente estão disponíveis em dados históricos do pavimento, passíveis de serem analisados e trabalhados para que o erro de divisão em secções de comportamento homogéneo seja o menor possível. Assim, para o troço em estudo

a divisão é efetuada quando há uma mudança de um parâmetro para outro, como ilustra a Figura 4.

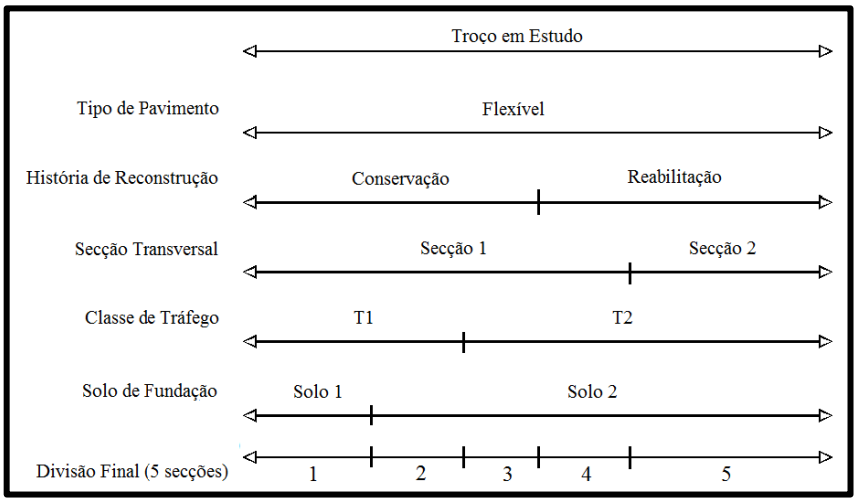


Figura 4 - Fatores a considerar para a divisão em comportamento homogéneo (NCHRP, 2004)

A obtenção das subsecções baseia-se num tratamento estatístico dos valores das deflexões obtidas, de forma a distinguir as diferentes subsecções e, dentro dessas obter a bacia de deflexões característica de cada uma.

A definição das subseções homogéneas pelo método denominado “Método das Diferenças Acumuladas” (*Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences*), recomendado no Guia de Projeto de Pavimentos (AASHTO, 1993) baseia-se numa homogeneização racional do troço em estudo, podendo serem utilizadas as deflexões ou outro parâmetro relevante para a análise. No entanto, como já foi exposto, para a análise estrutural de um pavimento tem-se em conta a deflexão máxima, sendo esta deflexão a que representa globalmente o pavimento em estudo.

Sendo assim, a divisão em zonas homogéneas pelo método da AASHTO compreende várias etapas: primeiro, deve ser calculada a média da deflexão máxima registada para todos os pontos de ensaio do troço auscultado. Em seguida, para esses mesmos pontos de ensaio, deve ser calculado a diferença entre a deflexão máxima obtida e a média da deflexão máxima (cálculo dos desvios em relação à média da deflexão máxima) e deve-se considerar também a soma dos desvios acumulados para cada ponto de medição da deflexão máxima. Por último, é elaborado um gráfico em que nas abcissas se desenvolvem pontos de ensaio ao longo do troço auscultado e nas ordenadas os valores dos desvios acumulados (AASHTO, 1993).

Por conseguinte, os cálculos a efetuar seguem a seguinte expressão de cálculo:

$$Z_i = d_i - d_m + Z_{i-1} \quad (2)$$

Sendo:

Z_i - soma acumulada dos desvios da média ao ponto de ensaio i;
d_i - a deflexão máxima no ponto de ensaio i;
d_m - média da deflexão máxima para todo o troço auscultado.

De seguida é apresentado um gráfico tipo obtido pelo Método das Diferenças Acumuladas.

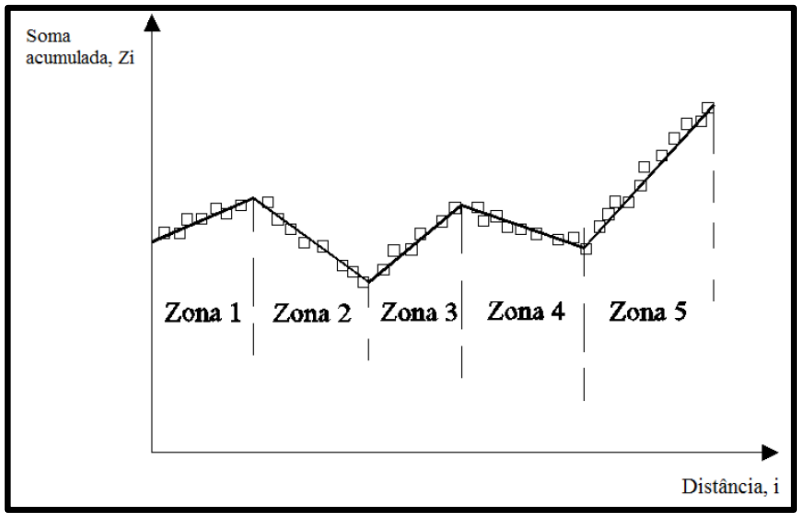


Gráfico 1 - Divisão das zonas homogéneas pelo método das Diferenças Acumuladas (AASHTO, 1993)

Este gráfico permite delimitar as zonas homogéneas e definir por zonas de comportamento estrutural homogéneo, cada intervalo de mudança de declive.

Dado a divisão em zonas homogéneas, é necessário obter a deflexão característica de cada zona para que, posteriormente, seja elaborada uma análise do defletograma obtido classificando estruturalmente o pavimento e, se for o caso, procedendo-se ao estudo de uma solução de reabilitação estrutural.

Para cada zona homogeneizada, é selecionado o valor de deflexão do estado que aparenta o pavimento. Normalmente, para esse valor de deflexão característica, d_k, é fundamental fazer uma análise estatística dos dados obtidos, determinando a média e o desvio padrão, com o objetivo de se calcular o percentil de 85%. Utiliza-se esse percentil por se considerar que a deformada representativa de cada zona é aquela a que correspondem deflexões cuja probabilidade de serem excedidas é inferior a 15%.

$$P_{85\%} = m + 1{,}04 \times s \quad (3)$$

$$m = \sum \frac{d_i}{n} \quad (4)$$

$$s = \sum \frac{(d_i - m)^2}{(n-1)} \quad (5)$$

sendo:
m - média;
d_i - deflexão no ponto de ensaio i;
n - número de pontos medidos;
s – desvio padrão.

Posto isto, a deflexão característica, d_k, é aquela que mais se aproxima do percentil 85.

As características do pavimento são obtidas através dos valores das deflexões, tendo como exemplo, os módulos de deformabilidade das várias camadas do pavimento através da retroanálise (Benta, Picado-Santos, & Macedo, 2008).

2.2.4.2. Caracterização mecânica do pavimento – Retroanálise

Para concluir a avaliação estrutural de um pavimento, é necessário conhecer o módulo de deformabilidade de cada camada e do solo de fundação pertencente ao pavimento em estudo, de forma a caracterizá-lo mecanicamente.

Os módulos de deformabilidade das diferentes camadas de um pavimento são obtidos com base num processo denominado de análise inversa ou retroanálise (*backcalculation*), através do programa automático ModComp. Este método compreende um processo iterativo de comparação dos deslocamentos superficiais, obtidos pelos ensaios não-destrutivos, com os deslocamentos conseguidos pelo programa de cálculo automático (Albernaz, Motta, & Medina, 1995). Esta comparação é feita de maneira a analisar a convergência entre as duas deformadas.

O processo fundamenta-se na introdução das características mecânicas e geométricas como os módulos de deformabilidade, coeficiente de Poisson e espessuras. Sendo os módulos de deformabilidade das várias camadas arbitrados ou estimados, os coeficientes de Poisson correspondentes a cada material e as espessuras obtidas na prospeção mecânica introduzidos na janela do programa, além da posição dos sensores e a força de pico aplicada durante o ensaio (Hunter, 1994).

Na Tabela 3 estão representados os valores simbólicos dos módulos de deformabilidade e dos coeficientes de Poisson dos vários materiais usados nos pavimentos rodoviários.

Camadas	Módulo de deformabilidade (MPa)	Coeficientes Poisson (ν)
Betão Betuminoso	7000 a 9000 (T=15ºC) 5000 a 6000 (T=20ºC) 3000 a 4000 (T=25ºC)	0,35
Betão Betuminoso fendilhado	500 a 1000	0,35
Agregado tratado com cimento	10000 a 20000	0,25
Solo-cimento	1000 a 5000	0,25
Base granular britada	150 a 300	0,35
Sub-base granular britada	100 a 200	0,35
Solos selecionados	60 a 100	0,40

Tabela 3 - Módulos de Deformabilidade usuais para a camadas de pavimentos (EP-JAE, 1995)

Como referido anteriormente, com o intuito de aproximar o melhor possível a deformada representativa de cada zona e a obtida pelos ensaios, é avaliado o erro RMS utilizando a equação (6). Caso o erro RMS (*Root Mean Square*), entre a deformada calculada e a deformada medida, seja inferior a 15% (RMS<15%), os módulos de deformabilidade encontrados relacionam-se bem com o comportamento estrutural do pavimento (Henry & Wambold, 1992).

$$RMS(\%)= \left(\sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{d_{ei} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2} \right) \times 100 \qquad (6)$$

sendo:

n - número total de pontos de registo da deflexão para o ponto de ensaio i;
d_{ei} - deflexão calculada para o ponto de ensaio i;
d_{mi} - deflexão média do ponto de ensaio i.

2.2.4.3. Efeito das condições climáticas sobre o Módulo de Deformabilidade

Para o programa de cálculo automático (ModComp), os valores do módulo de deformabilidade apresentados não estão associados ao efeito da temperatura de projeto. A única relação que estes módulos têm com a temperatura são os valores das deflexões registadas em cada ensaio, que ocorrerem segundo a temperatura a que se encontra o pavimento na altura dos ensaios. Dado que, a temperatura de projeto, geralmente, é superior à temperatura a que se efetuam os ensaios de carga, é necessário corrigir o módulo de deformabilidade obtido para as camadas betuminosas.

Aquando da execução dos ensaios de carga, raramente as misturas betuminosas se encontram à temperatura de projeto exigindo, por regra, a correção dos módulos de deformabilidade para a temperatura de projeto, dá-se a partir dos obtidos nos ensaios de carga.

Existe uma panóplia de fórmulas para se proceder à correção do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas, obtidos com base em ensaios de cargas a temperaturas diferentes. Consoante a metodologia da Shell (Shell, 1978), o módulo de deformabilidade das misturas betuminosas deve ser definido para um valor de temperatura de projeto obtido em função da temperatura do ar e da espessura total das misturas betuminosas.

No dimensionamento de pavimentos rodoviários em Portugal, utiliza-se, de forma conservativa, o gráfico da Figura 5 (Claessen, Edwards, Sommer, & Ugé, 1977) para determinar a temperatura de projeto de cada camada betuminosa, adotando um valor de espessura equivalente a uma profundidade correspondente a metade da espessura da camada em apreço. Em alternativa, utiliza-se a metodologia preconizada pelo Manual de Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis das Estradas de Portugal (EP-JAE, 1995).

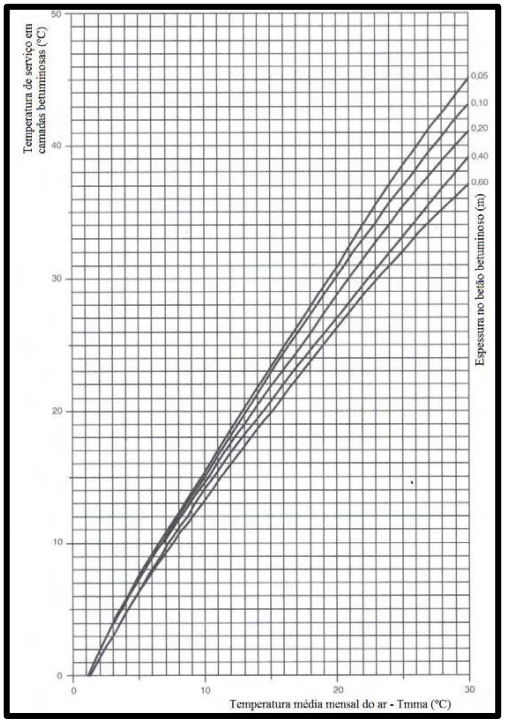


Figura 5 – Temperatura de Projeto de camadas betuminosas

É igualmente importante ter em consideração a temperatura a que se encontra o interior das camadas betuminosas, sendo calculado por BELLS3 (*Basltzer, Ertman-Larsen, Lukanen e Stubstad*).

A temperatura do pavimento em profundidade, T_d, é obtida através da expressão (7):

$$Td=0,95+0,892*IR+0,042\times \sin(hr_{18}-13,5) +[\log(d)-1,25]\times[-0,45*IR+0,621\times T_{24H}+1,83\times\sin(hr_{18}-15,5)] \quad (7)$$

Sendo:

T_d - temperatura do pavimento em profundidade, ºC;
IR – temperatura à superfície, ºC;
d -profundidade a qual a temperatura da camada é retirada, mm (1/2 ou 1/3 de profundidade);
T_{24H} - temperatura média do ar no dia anterior, ºC; hr_{18} – hora do dia no sistema 24 Horas.

A função decimal sin(hr_{18}-15,5) deve ser usada apenas para intervalos entre as 11:00 e as 05:00 horas da manhã seguinte. Se a hora a que o ensaio foi praticado não se encontrar dentro desse intervalo, o sin calculado deverá ser para as 11 horas (onde sin=-1). Se o tempo estiver entre as 00:00 e as 05:00 horas, adiciona-se 24 ao tempo real decimal. Por exemplo, se o relógio indicar 13:15 horas, em forma decimal, temos: 13,25-15,5=-2,25; -2,25/18=-0,0125; -0,0125*2π=-0,785 radianos; sin(-0,785)=-0,707.

A função decimal sin(hr_{18}-13,5) deve ser usada apenas para intervalos entre as 09:00 e as 03:00 horas da manhã seguinte. Se a hora a que o ensaio foi praticado não se encontrar dentro desse intervalo, o sin calculado deverá ser para as 09 horas (onde sin=-1). Se o tempo estiver entre a 00:00 e as 03:00 horas, adiciona-se 24 ao tempo real decimal. Por exemplo, se o relógio indicar 15:08 horas, em forma decimal, temos: 15,13-13,5=1,63; 1,63/18=0,091; 0,091*2π=0,569 radianos; sin(0,569)=0,539.

Finalmente existem diversas fórmulas para corrigir o módulo de deformabilidade consoante a temperatura (Akbarzadeh, Bayat, & Soleymani, 2012). A fórmula utilizada (Ullidtz & Peattie, 1982) é:

$$\left.\begin{aligned}\frac{E_{T.projeto}}{E_{15ºC}} &= 1\text{-}1{,}384 \times \log\left(\frac{T_{Projeto}}{15ºC}\right)\\ \frac{E_{T.BELLS3}}{E_{15ºC}} &= 1\text{-}1{,}384 \times \log\left(\frac{T_{BELLS3}}{15ºC}\right)\end{aligned}\right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{T.Projeto} = \left(\frac{E_{Retro\text{-}análise}}{1\text{-}1{,}384 \times \log\left(\frac{T_{BELLS3}}{15ºC}\right)}\right) \times \left(1\text{-}1{,}384 \times \log\left(\frac{T_{Projeto}}{15ºC}\right)\right) \quad (8)$$

Os módulos de deformabilidade obtidos numa primeira instância, através do cálculo efetuado pelo ModComp, são corrigidos pelo método descrito acima. É de ter em conta, que tal correção só é feita nas camadas betuminosas. Nas camadas granulares e na fundação o módulo de deformabilidade não sofre qualquer tipo de correção, pois essas estruturas não são afetadas, diretamente, pela temperatura.

2.3. PRINCIPAIS DEGRADAÇÕES DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS

Os pavimentos, ao serem sujeitos às ações dos veículos (tráfego pesado) e climáticas (variações de temperatura e água), vítimas de erros de projeto e construção (p.e., materiais inadequados) evoluem com aparecimento de uma vasta diversidade de degradações que se traduzem numa contínua redução da sua qualidade.

A nível funcional, as degradações que revelam más condições de acústica e desconforto, derivam da aderência pneu/pavimento sendo importantes, sobretudo, ao nível da segurança da circulação.

O aparecimento de degradações pode ser um sinal natural da aproximação do fim da vida útil de um pavimento. No entanto, quando surgem precocemente, revela algo anormal, podendo antecipar o fim da vida útil esperado.

Para os pavimentos flexíveis, as degradações podem ser agrupadas nos seguintes grupos (Branco, Pereira, & Santos, 2011):

- deformações;
- fendilhamento;
- desagregação da camada de desgaste;
- movimento de materiais.

Estas famílias de degradações têm uma sequência e interação entre elas, como se pode verificar na tabela seguinte, cujo aumento do fendilhamento e/ou deformações provoca a desagregação da camada superficial e o movimento de materiais.

Estes grupos de degradações contêm em si vários tipos de patologias, de acordo com a Tabela 4.

FAMILIAS DE DEGRADAÇÕES	TIPOS DE DEGRADAÇÕES
Deformações	Abatimento: Longitudinal (berma; eixo); Transversal Deformações Localizadas Ondulação Rodeiras: Grande raio (camadas inferiores); Pequeno raio (camadas superiores)
Fendilhamento	Fendas: Fadiga; Longitudinais (eixo; berma); transversais; parabólicas pele de crocodilo: malha fina (≤40cm); malha larga (>40cm)
Desagregação da camada de desgaste	Desagregação superficial Cabeça de gato Pelada Ninhos (covas)
Movimento de materiais	Exsudação Bombagem de finos

Tabela 4 - Familias e Tipos de Degradações (Teng, 2003)

Em Portugal, como já referenciado anteriormente, as degradações mais relevantes são as deformações permanentes (rodeiras) e o fendilhamento. Seguidamente, são descritos os vários tipos de degradações das diversas famílias, tomando como referência o descrito em (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

2.3.1. Deformações

As deformações permanentes que se observam na superfície de um pavimento podem ser subdivididas em 4 tipos:

i. O abatimento é uma deformação com expansão significativa, podendo apresentar-se quer na longitudinal, quer na transversal. O abatimento longitudinal junto à berma é resultado de uma redução da capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação. O abatimento transversal, pode dever-se à deficiente compactação das camadas granulares, à falta de capacidade de suporte do solo de fundação e/ou à infiltração de água por fendas transversais. No que concerne à sua localização, depende da ocorrência de patologias nas camadas inferiores (camadas granulares e solo de fundação).
ii. A ondulação é uma deformação transversal que se repete com frequência ao longo do pavimento. Pode ter origem devido a lacunas na distribuição do ligante nas camadas de desgaste, ao arrastamento da mistura, em camadas de betão betuminoso, por excessiva deformação plástica causada pela ação do tráfego ou por deformação da fundação, causando uma ondulação suave no pavimento. A probabilidade de ondulação agrava-se em traineis de grande inclinação.
iii. As deformações localizadas resultam da rotura do pavimento numa pequena área.
iv. As rodeiras são deformações longitudinais, desenvolvidas através da passagem dos pneus dos veículos, podendo ser de pequeno ou grande raio. Este tipo de degradação é o mais usual na família das deformações.

2.3.2. Fendilhamento

Em pavimentos flexíveis, o fendilhamento constitui a degradação mais frequente. Existe uma grande variedade de fendas, resultado, na maioria dos casos, da fadiga dos materiais das camadas betuminosas, podendo ser classificadas como isoladas ou ramificadas (múltiplas).

As fendas parabólicas são em geral resultado de problemas de estabilidade da camada de desgaste e da sua ligação às camadas betuminosas inferiores, situações que resultam no aparecimento de fendas com o eixo da parábola orientado no sentido longitudinal na zona de passagem dos pneus. Este tipo de fendas pode ser originado pela imperfeita ligação entre a camada de desgaste e a camada betuminosas inferior, ou através de condições severas de aplicações de cargas, ações climáticas desfavoráveis (temperatura elevada) e espessura e resistência reduzida da camada de desgaste. Podem desenvolver-se até à formação de peladas.

Cada vez mais se presta atenção ao fendilhamento com origem na superfície do pavimento, sem, no entanto, atingir a base das camadas betuminosas, que pode ter origem quer em imperfeições no processo construtivo quer na deficiente compactação e segregação das misturas betuminosas, na agressividade do tráfego e em temperaturas elevadas.

A pele de crocodilo é o resultado da evolução das fendas ramificadas (múltiplas), passando a formar uma malha ou uma grelha. Esta degradação pode classificar-se consoante a abertura da malha, em malha estreita (lado da malha ≤ 40 cm) ou em malha larga (≥ 40 cm) e, quanto à abertura dos bordos das fendas, em aberta e fechada. A pele de crocodilo evolui de malha larga para malha estreita, enquanto que as fendas evoluem de fechadas para abertas, podendo na fase final dar origem aos ninhos.

2.3.3. Desagregação da camada de desgaste

A desagregação da camada de desgaste reflete-se numa perda de qualidade superficial, resultante da deficiente ligação entre os diferentes materiais constituintes da mistura betuminosa, dando lugar ao desprendimento dos agregados grossos.

No entanto, a desagregação pode ter, como causas diretas, deficiências na qualidade dos materiais, nomeadamente durante a execução da camada de desgaste, a segregação dos inertes em central, aquando do transporte ou da colocação do mesmo, presença de água e condições desfavoráveis na fase de construção.

Esta família de degradação também se subdivide em diversas patologias:

i. A desagregação superficial, que é uma das degradações mais importantes desta família, que se dá em duas fases: numa primeira de desagregação do material de mistura fina e numa segunda de desagregação do agregado de granulometria mais grossa.

   Esta primeira fase é a designada de “cabeça de gato”, que consiste no destacamento do material de granulometria fina, composto pela mistura de finos, filer e ligante betuminoso, expondo e salientando o agregado de maior dimensão, deixando assim o pavimento com uma macrotextura elevada.

   Este tipo de patologia pode ser originado através do elevado tráfego rodoviário, na má qualidade dos materiais e na sua má execução. Nomeadamente, originados a partir da segregação dos inertes em central, no transporte ou na sua colocação, deficiente qualidade do betume, derivado à presença de humidades por insuficiente secagem dos inertes e deficiente compactação do betume devido, ou não, à aplicação sob condições de temperatura muito reduzida.

ii. A pelada, conhecida também como descamação, é o desprendimento de pequenas placas da camada de desgaste desligadas da camada inferior. Esta degradação pode estar relacionada com a reduzida espessura da camada de desgaste e uma deficiente ligação entre a camada de desgaste e a inferior.

   A pelada apresenta um risco para a segurança rodoviária por a passagem dos rodados poder fazer ressaltar o veículo e danificá-lo a nível de pneus e suspensão, e, em última instância, favorecer despistes.

iii. A desagregação dos bordos das fendas, é resultado da evolução da pele de crocodilo dando origem aos ninhos. Estes são cavidades arredondadas formadas na camada de desgaste e podem estar relacionados com a evolução da desagregação superficial e evolução do fendilhamento em geral.

   A passagem repetida dos veículos sobre ninhos acelera a sua degradação, levando à sua progressão em extensão e profundidade. A ação da água também é um fator de progressão acelerada de tal degradação.

iv. O polimento, resulta do desgaste por abrasão, fundado no contato do pneu com o pavimento dando lugar, geralmente, a um aspeto polido e brilhante nos agregados de maior granulometria da superfície da mistura.

   É um processo natural de desgaste dos agregados, mas que pode ser acelerado pela má qualidade dos materiais utilizados e pela intensidade do tráfego rodoviário. A utilização de demasiada quantidade de betume, em fase de construção, também pode originar uma superfície demasiado lisa.

Esta patologia também causa transtornos na segurança, pois reduz o atrito de contato pneu-pavimento e condiciona a aderência dos veículos ao pavimento, que pode agravar na presença de fatores como a água.

2.3.4. Movimento de Materiais

Esta família de degradações está associada a patologias referentes à movimentação de materiais constituintes das camadas (betuminosas ou granulares), ou da fundação através das camadas do pavimento.

A subida ou bombagem de finos, verifica-se quando um pavimento tem as suas camadas fendilhadas e, ao mesmo tempo, existe um nível freático muito elevado devido às ações climáticas e às condições de drenagem. Nestas condições, com a presença de água no interior do pavimento e com a repetida passagem dos veículos, devido à compressão exercida sobre o pavimento, provoca-se uma expulsão da água que estava retida no interior através das fendas existentes. Junto dessa água são transportados finos das camadas atravessadas.

A exsudação é o resultado da alteração da composição da camada de desgaste, em que o excesso de ligante sobe até à superfície, envolve agregados grossos e reduz a sua macrotextura.

2.4. REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS

A necessidade de garantir uma adequada conservação/reabilitação do grande parque de autoestradas e vias rápidas que Portugal e as suas Regiões construíram nas últimas décadas deu lugar a um "*boom*" dessa atividade. Como já acontece nos países e regiões mais desenvolvidas, em detrimento da construção de novas estradas, tende, cada vez mais, para a área de conservação/reabilitação uma maior parcela dos investimentos públicos (Branco, Pereira, & Santos, 2011), diretos ou indiretos.

Devido à degradação dos pavimentos, torna-se necessário potencializar ações de reabilitação dos pavimentos rodoviários, ao longo do seu período de vida, para que possam fornecer as qualidades mínimas exigidas pelos utentes: comodidade, segurança e economia.

As degradações têm dois tipos de interferência com a qualidade do pavimento: a qualidade funcional, que diz respeito à qualidade de circulação captada pelos utilizadores; e a qualidade estrutural, relacionada com a aptidão do pavimento para resistir às cargas dos veículos.

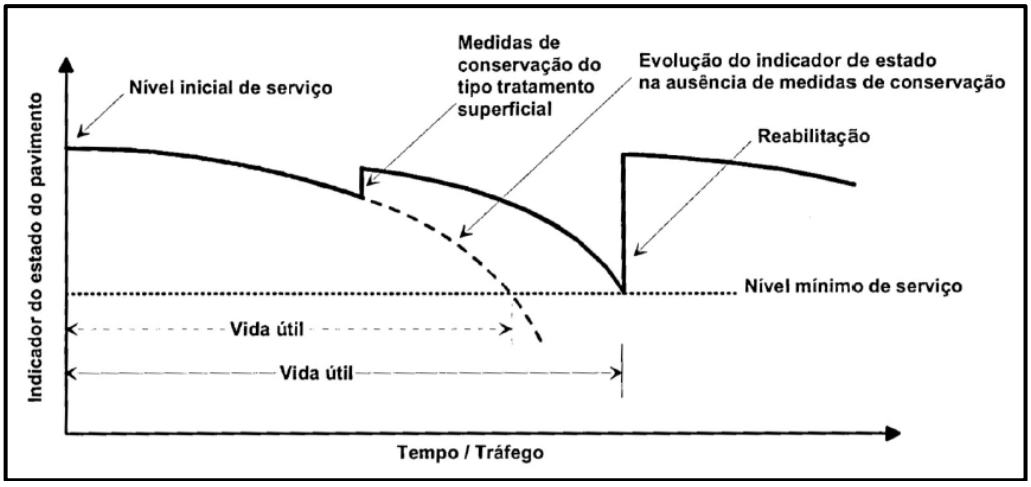


Figura 6 - Evolução do estado do pavimento ao longo do tempo (Estradas, 2013)

Convém ressaltar que estes dois tipos de interferências estão frequentemente interligados entre si (p.e., a existência de fendilhamento à superfície do pavimento originados pela variação de temperatura, permite a entrada de água para o interior da estrutura, o que conduz, à redução da capacidade estrutural das camadas granulares).

2.4.1. Reabilitação das características funcionais

Uma reabilitação deste tipo pretende recuperar as características superficiais iniciais de um pavimento ou simplesmente melhorar algumas características que, entretanto, se tenham deteriorado. As técnicas utilizadas a este nível servem assim, sobretudo, para reabilitar características como a rugosidade, a regularidade longitudinal e transversal e a impermeabilidade da camada de desgaste. Incrementos na redução de ruído, principalmente em zonas urbanas, e na drenabilidade, para diminuir a projeção de água, são também propósitos de reabilitações funcionais.

A reabilitação funcional não deve de ser aplicada a pavimentos com importantes lacunas estruturais, como deformações, sendo apenas indicada para a reabilitação de pavimentos levemente fendilhados ou com desagregação.

Todas as técnicas de conservação ou reabilitação das características superficiais consistem no uso de camadas betuminosas delgadas, com pequena alteração da cota da camada de desgaste, sendo, regra geral, soluções económicas e de rápida execução.

As técnicas para reabilitação das características superficiais mais conhecidas e utilizadas em Portugal (Branco, Pereira, & Santos, 2011) são:

Revestimentos betuminosos superficiais, que consistem na aplicação de camadas de desgaste delgadas, resultantes da sobreposição de uma ou mais camadas de ligante betuminoso e de agregado, de forma alternada, sobre o pavimento existente. Quando se procura apenas melhorar a rugosidade oferece das melhores relações custo/beneficio.

Microaglomerado betuminoso a frio, consiste na aplicação de uma mistura betuminosa a frio com emulsão betuminosa, geralmente modificada, realizada "*in situ*" e posteriormente espalhada sobre o pavimento no estado fluído numa camada muito delgada. Trata-se de uma técnica bastante útil para a impermeabilização da camada principal, permitindo também melhorias no que concerne à rugosidade e aderência do pneu ao pavimento.

Lama asfáltica (Slurry Seal), é bastante semelhante ao microaglomerado betuminoso a frio, tendo como única diferença o fato de se recorrer a agregados de menor dimensão. Proporciona reduzida macro e microrugosidade, a qual diminui a aderência dos pneus ao pavimento, principalmente quando o piso se encontra molhado.

Argamassa betuminosa, consiste numa mistura betuminosa concebida essencialmente para executar interfaces retardadoras do processo de propagação de fendas (SAMI), pois adapta-se bem a deformabilidades acentuadas.

Betão betuminoso (BB), a sua produção é concebida em central a quente, pela junção do ligante de betume puro a agregados britados. O betão betuminoso é das misturas betuminosas mais utilizadas em camadas de desgaste com espessura normalmente até 5 cm.

Betão betuminoso drenante (BBD), é aplicado como camada de desgaste e tem o intuito de melhorar a segurança e comodidade de circulação do utente. Este tipo de mistura foi desenvolvido para melhor drenar a água da superfície melhorando a visibilidade e diminuindo o risco de hidroplanagem. Contudo, devido à elevada percentagem de vazios (20 a 25%), que também reduz o ruído, apresenta uma menor resistência aos efeitos abrasivos do tráfego.

As misturas rugosas, em particular o *betão betuminoso rugoso (BBR)* e o *microbetão betuminoso rugoso (MBBR),* proporcionam uma excelente macrotextura, o que permite uma

maior segurança e redução do ruído de circulação. Em comparação com o BBD, têm uma maior percentagem agregados finos, conferindo-lhe maior resistência à ação abrasiva do tráfego.

2.4.2. Reabilitação das características estruturais

A reabilitação estrutural consiste na execução de uma ou mais camadas (desgaste, regularização e base) e, caso necessário, de outros trabalhos complementares (p.e., melhoria no sistema de drenagem).

As técnicas de reabilitação estrutural são soluções a longo prazo, geralmente para 10 a 20 anos, que, para além de permitirem melhorias na capacidade estrutural do pavimento, possibilitam melhorias nas características superficiais do mesmo, dado que estas técnicas implicam sempre a aplicação de uma nova camada de desgaste (Miranda & Pereira, 1999).

Este tratamento consiste no reforço do pavimento com misturas betuminosas a quente, tendo como principal objetivo o aumento da sua capacidade estrutural. No caso de os pavimentos não apresentarem grandes degradações nem condicionamentos de cota, é aplicado uma camada de betuminoso sobre o pavimento existente, depois de se proceder a pequenas reparações ao nível de selagem de fendas, tapagem de covas, melhoramento da drenagem, etc.

Atualmente existem várias técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos flexíveis que passam pela colocação de uma camada de reforço no pavimento existente ou pela reciclagem do pavimento, de maneira a eliminar as fendas presentes.

Havendo limitações ao aumento da cota do pavimento, pode optar-se por utilizar betumes modificados, que permitem diminuir as espessuras das camadas a executar.

A adição de polímeros aos ligantes/misturas betuminosas confere-lhes uma melhoria significativa, nomeadamente na sustentabilidade térmica e na flexibilidade (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012). Embora a adição de polímeros virgens cumpra com o objetivo de melhorar as propriedades da mistura betuminosa, a utilização de polímeros reciclados deve ser preferida por preocupações ambientais.

2.5. VIDA RESTANTE DE UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO

A vida restante ou vida residual de um pavimento rodoviário flexível resulta da aplicação de um modelo à estrutura do pavimento e no cálculo de se, e quando, deverá ocorrer fendilhamento à superfície do pavimento.

Antes do pavimento entrar em serviço, o tráfego passado (N_p) é nulo e a vida restante é definida através do número admissível de passagens de eixo-padrão, calculado com base no critério de ruína condicionante. Logo após o pavimento entrar em serviço, este começa a perder qualidades estruturais ao longo do tempo, diminuindo assim a capacidade de suportar cargas (Freitas & Pereira, 2001).

A vida restante (Freitas & Pereira, 2001) de um pavimento rodoviário é dada por:

$$V_f = N_a - N_p \quad (9)$$

Sendo:

N_a – número admissível de passagens correspondentes ao critério de ruína condicionante;
N_p – número de passagens correspondentes ao tráfego passado.

Caso o número de passagens correspondentes ao tráfego passado (N_p) não seja superior ao às passagens admissíveis resultantes do critério de ruína condicionante (N_a), a capacidade de carga pela ação desse tráfego não foi esgotada, possuindo assim o pavimento uma vida restante (Jacinto, 2003).

2.6. DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE REFORÇOS DE PAVIMENTOS

Os pavimentos rodoviários ao longo da sua vida útil vão sofrendo sucessivas degradações que interferem no conforto e segurança da circulação e reduzem a aptidão do pavimento para suportar as mais variadas cargas.

Para repor qualidades perdidas pelos pavimentos ou para melhorá-lo tem, por vezes, de se proceder a reforços cujo dimensionamento é idêntico ao utilizado para a construção de pavimentos novos. As espessuras de reforços a aplicar são obtidas comparando a estrutura que se obtém pelo dimensionamento efetuado para o tráfego que o pavimento após o reforço terá de suportar com a estrutura do pavimento existente. Nesta comparação deve-se ter em consideração a caracterização do pavimento existente e, se possível, quantificar o seu desgaste (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

O dimensionamento de um reforço do pavimento rodoviário flexível, como o de qualquer outra estrutura de Engenharia Civil, consiste inicialmente na quantificação das ações atuantes no pavimento, em idealizar uma estrutura inicial constituída por materiais com determinadas propriedades mecânicas, em analisar o comportamento da estrutura, utilizando métodos de cálculo e modelos de comportamento, geralmente recorrendo-se a programas de cálculo automático, por último, em comparar o estado tensão/deformação, resultante da análise estrutural, com o estado limite crítico dos materiais, sem que se verifique rotura total ou parcial. Com base nestes dados, torna-se possível definir o tipo de pavimento e os materiais a utilizar em cada camada.

2.6.1. Tráfego presente no pavimento rodoviário

Visto o tráfego ser muito variável e depender de inúmeros fatores conjunturais e das próprias características da malha rodoviária em que determinado trecho de estrada se insere pode ser um exercício bastante difícil caracterizar a sua grandeza num ano futuro, sobretudo quando não se dispõem de recenseamentos fidedignos. No caso de escassez de dados de base, mesmo correndo riscos de sobredimensionamento, pode ser preferível adotar critérios conservativos.

O dimensionamento de pavimentos rodoviários recorre a estimativas do tráfego pesado por ser aquele que mais efetivamente os solicita. Em Portugal o tráfego pesado é tomado com correspondência aos veículos com um peso bruto igual ou superior a 3.000 Kg ou com comprimentos metálicos igual ou superior a 6,7 m.

Um dos parâmetros incontornáveis a considerar no dimensionamento de um pavimento rodoviário é o tráfego médio diário anual de veículos pesados ($TMDA_p$), para cada sentido e na via mais solicitada.

O dimensionamento passa por garantir que o pavimento é compatível, em termos de capacidade de carga, com o número acumulado de passagens de determinado eixo padrão de veículos pesados (N^p_{xkN}) durante a vida útil considerada, expresso por uma equação (10), que depende do tráfego pesado na via mais solicitada no ano de abertura, da taxa de crescimento anual e do período de dimensionamento.

$$N_{xkN}^{p} = 365 \times \frac{(1+t)^{p} - 1}{p \times t} \times p \quad (10)$$

Sendo:

N_{xkN}^{p} - número acumulado de veículos pesados durante p anos;
$TMDA_p$ - tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, na via mais solicitada
t – taxa média de crescimento anual do tráfego

De forma a homogeneizar o efeito das passagens de veículos pesados de diversas características, faz-se a conversão em passagens equivalentes de um eixo-padrão. O eixo-padrão consiste num eixo simples, contendo em cada extremo de um rodado duas rodas simétricas, afastadas uma da outra a uma certa distância, que se traduzem em duas ações de geometria circular sobre o pavimento.

Em Portugal é prática considerar-se o eixo-padrão de 80 kN no dimensionamento dos pavimentos flexíveis ((JAE), 1995). Outros países, como a Espanha e a França, utilizam o eixo-padrão de 130 kN aproximando-se das cargas máximas legais dos eixos simples.

Devido à dificuldade em classificar os veículos por tipo de eixos e respetiva carga por eixo, o MACOPAV, consoante a classe de tráfego, propõe fatores de agressividade, apresentados na Tabela 5.

Classe de tráfego	$(TMDA)_p$	Taxa de Crescimento anual (t)	Fator de agressividade	
			Eixo padrão de 80 kN	Eixo padrão de 130 kN
T_6	50 - 150	3	2	0,5
T_5	150 - 300		3	0,6
T_4	300 - 500	4	4	0,7
T_3	500 - 800		4,5	0,8
T_2	800 - 1200	5	5	0,9
T_1	1200 - 2000		5,5	1,0

Tabela 5 - Fator de agressividade do tráfego ((JAE), 1995)

As classes de tráfego do MACOPAV encontram-se na Tabela 6, classes definidas para o número de pesados acumulados num período de dimensionamento de 20 anos.

Classes de tráfego	
Classes	N.º de pesados em 20 anos na via de projeto
T_6	$0{,}5 \times 10^6 – 1{,}5 \times 10^6$
T_5	$1{,}5 \times 10^6 – 2{,}9 \times 10^6$
T_4	$3{,}3 \times 10^6 – 5{,}4 \times 10^6$
T_3	$5{,}4 \times 10^6 – 8{,}7 \times 10^6$
T_2	$9{,}7 \times 10^6 – 14{,}5 \times 10^6$
T_1	$14{,}5 \times 10^6 – 24{,}1 \times 10^6$

Tabela 6 - Classes de tráfego (Branco, Pereira, & Santos, 2011)

Caso a taxa de crescimento anual adotada na equação (10) seja diferente da indicada na Tabela 5, é necessário estimar o fator de agressividade através de uma metodologia alternativa, a saber:

i. Calcula-se o número acumulado de eixos pesados para um horizonte de 20 anos, período de dimensionamento dos pavimentos rodoviários flexíveis ((JAE), 1995).

ii. Com base nesse resultado, verifica-se em que classe de tráfego identificada na Tabela 6 se enquadra o número acumulado de pesados ao fim de 20 anos.

iii. Em seguida, para essa "nova" classe de tráfego, recorre-se à Tabela 5 para obter o fator de agressividade ((Branco, Pereira, & Santos, 2011); (EP-JAE, 1995)).

Assim, o número de eixos padrão acumulado durante o período de dimensionamento é dado por:

$$N_{130} = N_{pes}^{10} \times \alpha \tag{11}$$

Sendo:

N_{130} - número acumulado de eixos-padrão de 130 kN durante 10 anos;
α – fator de agressividade

2.6.1.1. Definição da geometria das cargas

Os esforços induzidos ao pavimento por parte dos eixos dos veículos pesados, em condições de dimensionamento, o eixo-padrão, correspondem a ações verticais, associadas sobretudo ao peso, sobre o formato de pressão exercida na superfície de contato. Também manifestam esforços tangenciais, porém não são determinantes para o funcionamento estrutural do pavimento, estando associados sobretudo ao rolamento do veículo e à ocorrência de travagem e derrapagem.

O eixo-padrão, como referido anteriormente, corresponde a um eixo simples que possui em cada extremo um rodado, equipado com duas rodas gémeas à distância "L" (Figura 7). A área "A" de contato de cada roda com o pavimento é aproximadamente elíptica, simplificadamente considerada circular, de raio "r". A pressão "p" de contato considera-se igual à pressão de enchimento dos pneus. Assim, conhecida a carga "P" do eixo-padrão, cada roda induz uma carga correspondente a P/4 distribuída por uma área dada por P/4p.

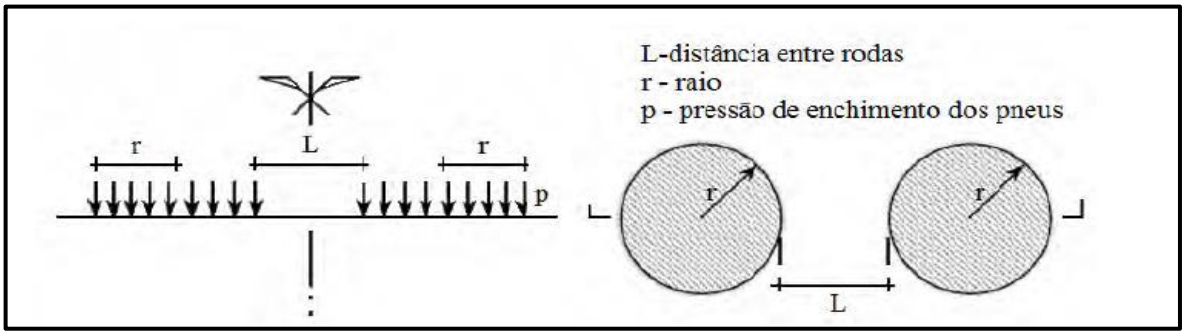


Figura 7 – Esquema para a ação de um eixo-padrão sobre um pavimento (Branco, Pereira, & Santos, 2011)

A geometria do carregamento é um parâmetro importante para o cálculo dos módulos de deformabilidade das camadas através da retroanálise, podendo ser quantificada recorrendo a duas metodologias, para eixos-padrão de 80 kN (Benta, Picado-Santos, & Macedo, 2008).

Método da Shell:

L=105 mm p=0,6 MPa r=105 mm

Método de Nottingham:

L=150 mm p=0,5 MPa r=113 mm

Para o caso de eixos-padrão de 130 kN é frequente utilizar-se:

L=125 mm p=0,66 MPa r=125 mm

2.6.2. Materiais betuminosos utilizados na camada de reforço

As características mecânicas da mistura betuminosa aplicada na camada de reforço dependem da composição volumétrica, do tipo de betume, das condições de temperatura e da velocidade de circulação.

O módulo de deformabilidade das misturas betuminosas a utilizar, quer na nova camada de reforço quer na retroanálise, podem ser conseguidos, recorrendo ao método da Shell ou de Nottingham. Para isso, deve ser efetuada uma análise inicial às características do betume e às características volumétricas das misturas betuminosas.

2.6.2.1. Características do betume

O principal fator condicionante da alteração do módulo de deformabilidade de uma mistura betuminosa é a rigidez do betume (S_b), que define a sua relação entre tensão e a extensão, sob determinadas condições de temperatura e de tempo de carregamento (Branco, Pereira, & Santos, 2011). A rigidez do betume, segundo (Ullidtz & Peattie, 1982) pode ser obtida recorrendo à equação:

$$S_b = 1{,}157 \times 10^{-7} \times tc^{-0{,}368} \cdot 2{,}718^{-I_{Pen}} \times (T_{ab} - T)^5 \quad (12)$$

Sendo:

S_b – rigidez do betume (MPa);
t_c – tempo de carregamento (s);
I_{Pen} – índice de penetração do betume;
T_{ab} – temperatura de amolecimento (ºC) pelo método de anel e bola;
T – temperatura de serviço a que se encontra o material.

A variável I_{Pen} pode ser calculada (Brown, Brunton, & Stock, 1985) recorrendo à equação:

$$I_{Pen} = \frac{20 \times T_{ab} + 500 \times \log(Pen_{25}) - 1955{,}55}{T_{ab} - 50 \times \log(Pen_{25}) + 120{,}15} \quad (13)$$

Sendo Pen_{25} a penetração (10^{-1}mm) no betume a 25ºC.

Devido ao ligeiro endurecimento que o betume apresenta após o fabrico e colocação em obra das misturas, no dimensionamento empírico-mecanicista de pavimentos rodoviários flexíveis, deve-se ter em consideração, a caracterização do betume às temperaturas de serviço. De maneira geral, para considerar este fenómeno, existem relações que permitem estimar as características do betume “em serviço” (Ullidtz & Peattie, 1982).

$$Pen_{25_r} = 0{,}65 \times Pen_{25} \quad (14)$$

$$T_{ab_r} = 99{,}13 - 26{,}35 \times \log(Pen_{25_r}) \quad (15)$$

Note que o índice “r” significa que a variável se refere a um betume recuperado, ou seja, já sofreu envelhecimento correspondente ao fabrico e colocação em obra.

A equação (12) só é, contudo, válida nas seguintes condições:

$20ºC \leq (T_{ab} - T) \leq 60ºC$;

$0{,}01s \leq t_c \leq 0{,}1\ s$;

$-1 \leq I_{Pen} \leq 1$

O tempo de carregamento (t_c) depende apenas da velocidade média do fluxo de tráfego pesado (v_t), geralmente de 50 km/h, sendo obtido através da seguinte equação:

$$t_c = \frac{1}{v_t} \tag{16}$$

Para calcular a rigidez do betume é necessário conhecer o tipo de betume a utilizar, visto que o parâmetro de penetração do betume (Pen_{25}) e a temperatura de amolecimento (T_{ab}) variam com o tipo de betume utilizado.

2.6.2.2. Características volumétricas das misturas betuminosas

As misturas betuminosas são constituídas por ar, betume e agregados, em diferentes percentagens variáveis também com a própria natureza dos agregados e do ligante.

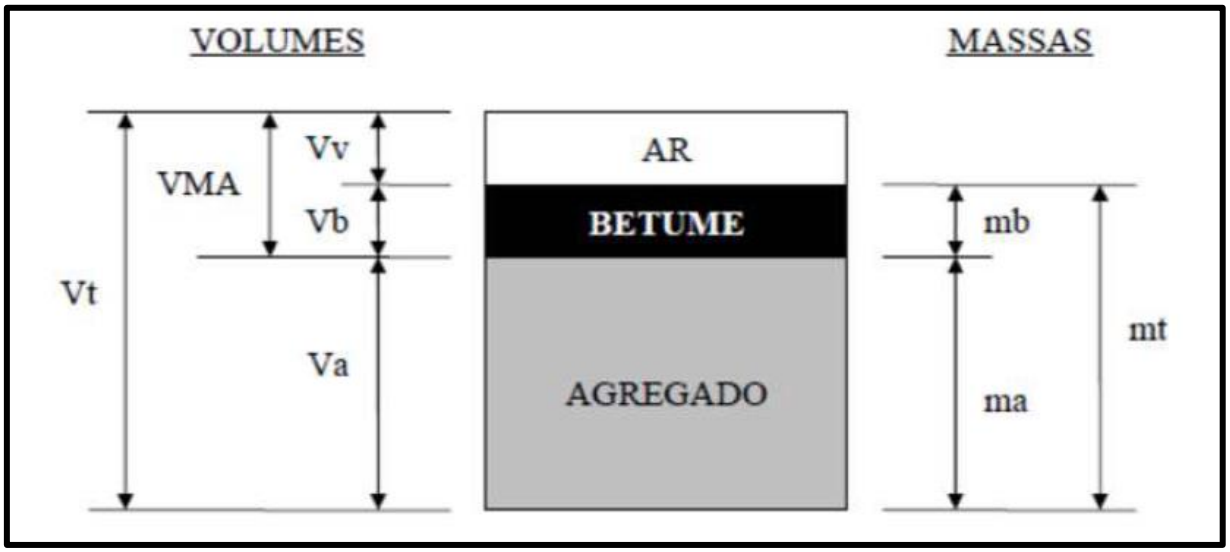


Figura 8 – Composição Volumétrica das misturas betuminosas (Branco, Pereira, & Santos, 2011)

O cálculo dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas exige a determinação da percentagem volumétrica de betume (V_b), da percentagem volumétrica de agregados (V_a) e do volume de vazios do esqueleto da mistura (VMA). Essas características determinam-se recorrendo às seguintes equações:

$$V_b = \left[(1 - \frac{n}{100}) \times \gamma_a \times \frac{t_b}{100}\right] / \left[\gamma_a \times \frac{t_b}{100} + \gamma_b\right] \tag{17}$$

$$V_a = \left(1 - \frac{n}{100} - V_b\right) \tag{18}$$

$$VMA = V_b + \frac{n}{100} \quad (19)$$

Sendo:

t_b – percentagem de betume;
γ_b – peso especifico do betume;
γ_a – peso especifico do agregado;
n – porosidade.

2.6.2.3. Módulos de deformabilidade nas misturas betuminosas

Recorrendo aos métodos da Shell e de Nottingham é possível estimar os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas.

Método da Shell:

No método da Shell o fator condicionante na previsão do módulo de deformabilidade é a rigidez do betume. Para obter-se o módulo utiliza-se a seguinte equação:

$$E_m\,(MPa) = 10^A \quad (20)$$

Para uma rigidez do betume (Sb) a variar entre 5 MPa e 1000 MPa, o expoente a utilizar na equação (20) corresponde a A. Caso se verifique uma variação entre 1000 MPa e 3000 MPa, utiliza-se um expoente B em substituição do A, na equação (20).

Os expoentes referidos anteriormente, são traduzidos pelas seguintes equações:

$$A = \frac{S_{89}+S_{68}}{2} \times (\log Sb - 8) + \frac{S_{89}-S_{68}}{2} \times |\log Sb - 8| + Sm_{108} \quad (21)$$

$$B = (Sm_{3109}-Sm_{108}-S_{89}) \times \frac{\log Sb - 9}{\log 3} + Sm_{108} + S_{89} \quad (22)$$

As variáveis apresentadas nas equações anteriores são definidas por:

$$S_{89} = 1{,}22 \times \frac{(Sm_{3109}-Sm_{108})}{\log 3} \quad (23)$$

$$S_{68} = 0{,}6 \times \log \frac{1{,}37 \times V_b - 1}{1{,}33 \times V_b - 1} \quad (24)$$

$$Sm_{3109} = 10{,}82 - \frac{1{,}342 \times (100 - V_a)}{V_a + V_b} \quad (25)$$

$$Sm_{108} = 8 + 5{,}68 \times 10^{-3} \times V_a + 2{,}35 \times 10^{-4} \times V_a^{\,2} \quad (26)$$

Para uma rigidez do betume inferior a 5 MPa, a equação (20) já não é válida, visto corresponder a um comportamento não linear (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Método de Nottingham:

No método de Nottingham, o módulo de deformabilidade da mistura betuminosa também depende da rigidez do betume, embora a equação só ser válida para valores de rigidez superiores a 5 MPa, dado que para valores inferiores corresponde a um comportamento não linear, do mesmo modo que o método da Shell (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

O módulo de deformabilidade é estimado segundo:

$$E_m(MPa) = S_b \times \left(1+\frac{257,5 + 2,5 \times VMA}{n \times (VMA-3)}\right)^n \quad (27)$$

Sendo:

$$n=0,83.\log\frac{4\times10^4}{Sb}$$

2.6.3. Critérios de ruína em pavimentos flexíveis

A metodologia utilizada para o dimensionamento de pavimentos flexíveis tem em atenção os estados limites de ruína, de fadiga e de deformação permanente.

O critério de ruína por fadiga está associado a fendilhamento excessivo na parte inferior das camadas betuminosas, por correlação com a maior extensão horizontal de tração (ε_t).

O critério de ruína por deformação permanente está associado a assentamentos excessivos à superfície do pavimento sendo controlado pela extensão vertical de compressão (ε_z), no topo do solo de fundação.

Para cada estado limite de ruína existe um dano, calculado através da equação (28) e expresso em percentagem.

$$D=\frac{N_p}{N_a}\,(\%) \quad (28)$$

Sendo:

D - dano previsível calculado(%);
N_p - número acumulado de eixos-padrão que irão solicitar a estrutura durante a vida útil do pavimento;
N_a - número acumulado de eixos-padrão admissível.

A danos previsíveis calculados, tanto de fadiga como de deformação permanente, inferiores a 80% correspondem pavimentos sobredimensionados e, se superiores a 100%, como subdimensionados(Claessen, Edwards, Sommer, & Ugé, 1977).

Na caracterização do comportamento de um pavimento, são, usualmente, realizados ensaios que permitam prever o seu comportamento próximo do real. Porém, no presente trabalho, adotaram-se os critérios numéricos implícitos do Método da Shell como bastantes para prever o comportamento dos pavimentos flexíveis, à fadiga e à deformação permanente, por serem os mais frequentemente utilizados em Portugal (Claessen, Edwards, Sommer, & Ugé, 1977).

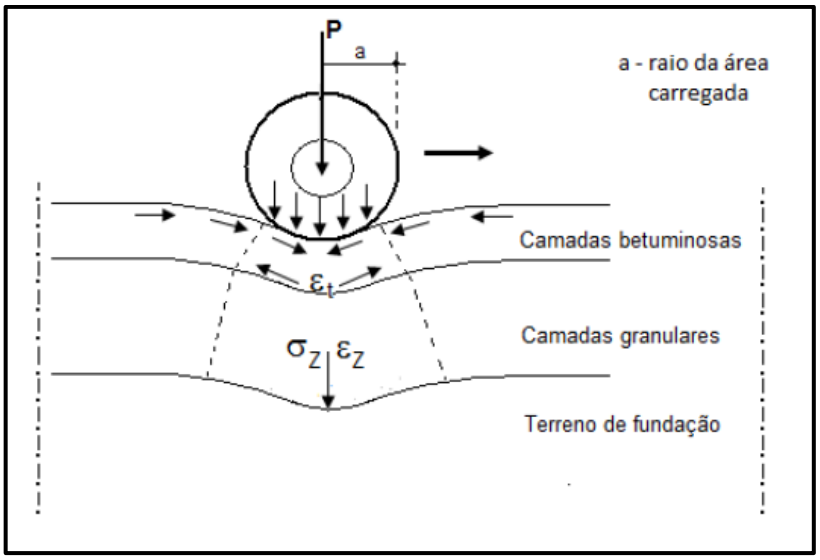


Figura 9 - Extensões dos estados limites de ruína (Ribeiro, 2012)

2.6.3.1. Lei do Fendilhamento por Fadiga

A "Lei do fendilhamento por fadiga" está associada ao valor da extensão instalada num carregamento, com o número de vezes que ela pode ser repetida, até à ruína do material por fadiga. Segundo o método da Shell, a equação que traduz o critério de fadiga é:

$$\varepsilon_t = \frac{0{,}856 \times TVB + 1{,}08}{E_m^{0{,}36} \times N_a^{0{,}20}} \quad (29)$$

A equação (29) pode ser escrita da seguinte forma:

$$N_a = \left(\frac{0{,}856 \times TVB + 1{,}08}{E_m^{0{,}36} \times \varepsilon_t}\right)^5 \quad (30)$$

Sendo:

N_a - Número acumulado de eixos-padrão admissível; ε_t – Extensão horizontal de tração;
TVB – Teor volumétrico de betume (%); Em – Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (Pa).

Existem alguns fatores na constituição de um pavimento rodoviário flexível que afetam a respetiva resistência à fadiga (Fontes, 2009). Com efeito, a utilização de uma granulometria fechada e um aumento da viscosidade do betume e rigidez, são fatores que permitem uma melhoria no efeito da resistência à fadiga, nos pavimentos rodoviários flexíveis.

2.6.3.2. Lei da Deformação Permanente

De forma semelhante, a "Lei da Deformação Permanente" relaciona o valor da extensão instalada num carregamento com o número de vezes que pode ser repetida até se atingir a rotura do material, ou seja uma deformação excessiva. De referir que a mistura só entra em ruína devido aos sucessivos carregamentos a que é sujeita a fazerem ultrapassar os seus limites heterogéneos de elasticidade e a sua capacidade de recuperação, isto porque, isoladamente, cada carregamento de per si provocaria uma apenas pequena inconsequente deformação (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

A equação que quantifica o critério de Deformação Permanente, segundo o método da Shell, é:

$$\varepsilon_z = \frac{k_1}{N_a^{0{,}20}} \quad (31)$$

A equação pode ser escrita em função do número acumulado de eixos-padrão admissível.

$$N_a = \left(\frac{k_1}{\varepsilon_z}\right)^4 \quad (32)$$

Sendo:

N_a - Número acumulado de eixos-padrão admissível;
ε_z - Extensão vertical de compressão;
K_1 – Parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento. Assume o valor de $2{,}8x10^{-2}$ para uma probabilidade de sobrevivência de 50%, $2{,}1x10^{-2}$ para 85% e $1{,}8x10^{-2}$ para 95%.

A Tabela 7 mostra existirem muitos fatores que influenciam a resistência à deformação permanente de um pavimento flexível (Sousa, Craus, & Monismith, 1991), a saber:

Parâmetro	Fator	Alteração do fator	Efeito da resistência à deformação permanente
Agregado	Textura Superficial	Lisa para rugosa	Aumenta
	Gradação	Descontínua para rugosa	Aumenta
	Forma	Redonda para angular	Aumenta
	Tamanho máximo	Aumento	Aumenta
Betume	Rigidez	Aumento	Aumenta
Mistura	Percentagem de Betume	Aumento	Diminui
	Volume de vazios	Aumento	Diminui
	VMA	Aumento	Diminui
Condições Locais	Temperatura	Aumento	Diminui
	Tensão/Extensão	Aumento da pressão contacto	Diminui
	Repetição de cargas	Aumento	Diminui
	Água	Seco para molhado	Diminui se a mistura for sensível à água

Tabela 7 - Fatores que influênciam a resistência à deformação permanente (Sousa, Craus, & Monismith, 1991)

2.6.3.3. Reflexão de fendas segundo a RPA

A colocação de uma nova camada betuminosa sobre uma camada fendilhada, provoca um funcionamento diferente daquele que se verificaria num pavimento novo com a mesma estrutura de referência. Também nesse caso os critérios de ruína à fadiga e à deformação permanente continuam a influenciar o reforço do pavimento, mas tem de considerar-se um mecanismo de ruína adicional, designado de reflexão de fendas (Pais, Pereira, & Azevedo, 2010).

As fendas intrínsecas nas camadas subjacentes propagam-se até à superfície das novas camadas betuminosas usadas no reforço contribuindo para a ruína prematura do pavimento. Deste modo, para evitar o aparecimento de fendas nas camadas betuminosas reabilitadas, (Sousa, Pais, Saim, & Way, 2002) desenvolveram um método empírico-mecanicista de reforços de pavimentos considerando a reflexão de fendas.

O método consiste numa relação entre a espessura de reforço e o tráfego esperado, entrando em conta, por um lado, com a espessura e os módulos do pavimento existente e, por outro, com o fendilhamento admissível no fim da pretendida vida residual do pavimento.

O módulo de deformabilidade obtido através da retroanálise, do pavimento existente, e o modulo de deformabilidade da mistura betuminosa do reforço devem ser corrigidos para a temperatura de projeto segundo a equação (8).

O próximo passo desta metodologia de dimensionamento consiste na determinação da percentagem da área de fendilhamento da zona estudada. Na ausência de valores de percentagem de reflexão de fendas, o Departamento de Transportes do Arizona (ADOT) sugere como valor de projeto, uma percentagem de fendilhamento de 5% (Pais, Sousa, Barreira, & Way, 2000).

O quarto passo deste dimensionamento, consiste na deliberação dos coeficientes de correção. Para esta metodologia elegem-se três fatores:

- Coeficiente de correção para o Envelhecimento (AAF);
- Coeficiente de correção para a Temperatura (TAF);
- Coeficiente de correção "*in situ*" (FAF).

Com o passar dos anos o desempenho das misturas betuminosas vai diminuindo, tornando a mistura mais endurecida e consequentemente aumentando o módulo de deformabilidade desta. O coeficiente de correção para o envelhecimento (AAF) foi introduzido nesta metodologia, para ter em conta o envelhecimento de uma mistura betuminosa aplicada numa camada de desgaste.

O coeficiente de correção para o envelhecimento é calculado recorrendo à temperatura máxima do ar e tendo em conta o tipo de mistura betuminosa a utilizar no reforço. As equações que permitem determinar este coeficiente são válidas para temperaturas máximas, T^{ar}_{max} entre 35ºC e os 50ºC (Pais, Sousa, Barreira, & Way, 2000).

Desta forma para uma mistura betuminosa convencional, o fator resume-se pela equação:

$$AAF = 0{,}0449 \times T^{ar}_{máx} - 0{,}2435 \quad (33)$$

E para uma mistura betuminosa com betume de borracha:

$$AAF = 0{,}0088 \times T^{ar}_{máx} + 0{,}7296 \quad (34)$$

Normalmente a reflexão de fendas surge quando o pavimento está sujeito a baixas temperaturas, daí o efeito da evolução das temperaturas ser um fator importante nesta metodologia de dimensionamento. Este fenómeno é bastante complexo e vários fatores são importantes (Sousa, Pais, Saim, & Way, 2002), tais como:

- Extensões induzidas pelo tráfego, quando este passa por cima ou próximo das fendas;
- O decréscimo de temperatura ao longo do ciclo diário, pode chegar a atingir variações de 20ºC a 25ºC. Este efeito, próximo das fendas pode causar tensões de tração superiores às registadas quando existe solicitação do eixo-padrão;
- A combinação destes dois fatores pode causar a rotura do material.

Desta forma, para ter em conta o efeito de variação da temperatura nas misturas betuminosas, a metodologia de dimensionamento adotada aplica um coeficiente de correção para a temperatura (TAF). Sendo que para misturas betuminosas convencionais segue a seguinte equação (Pais, Sousa, Barreira, & Way, 2000):

$$TAF = -0{,}092 \times RCT + 2{,}558 \quad (35)$$

E para misturas betuminosas com borracha, tem-se:

$$TAF = -0{,}0720 \times RCT + 1{,}745 \quad (36)$$

Onde a temperatura de ocorrência de reflexão de fendas (RCT) obtém-se a partir de:

$$RCT=T^{ar}_{min}+0,5 \times (TMMA- T^{ar}_{min}) \quad (37)$$

Sendo:

TMMA – temperatura média mensal doa r a determinar conforme o local onde se vai proceder à reabilitação do pavimento tendo em conta as temperaturas máximas (T^{ar}_{max}) e mínimas (T^{ar}_{min}) do ar.

É de ter em atenção, que à medida que a temperatura a que a camada de reforço se encontra diminui, o coeficiente de correção aumenta, originando um efeito ainda mais negativo para a temperatura. As misturas betuminosas com borracha apresentam fatores inferiores às misturas convencionais, devido à menor suscetibilidade às variações térmicas que estas apresentam (Pais, Sousa, Barreira, & Way, 2000).

O coeficiente de correção "*in situ"* foi introduzido nesta metodologia de forma a se ajustar em obra. Isto é, relaciona as previsões obtidas no dimensionamento da camada de reforço, através do método da reflexão de fendas, com os resultados obtidos em utilização ("*in situ*").

Este coeficiente depende da percentagem de área fendilhada (PC) e obtém-se a partir da equação:

$$FAF= e^{0,2303 \times PC} \quad (38)$$

Para qualquer tipo de mistura betuminosa, quando o coeficiente de correção "*in situ*" é superior a 1, significa que é esperado o aparecimento de fissuração na camada de reforço. Caso o coeficiente seja inferior a 1, a fissuração não deverá ocorrer (Sousa, Pais, Saim, & Way, 2002).

Para determinar a extensão de dimensionamento deve-se ter em consideração quer o módulo de deformabilidade da camada de reforço, reajustado, quer a espessura de cada uma das camadas que constituem o pavimento. Pode-se determinar o valor da extensão da camada de reforço a partir da sequência de equações seguintes:

$$a= \prod_{i=1}^{6} [a_{1i} \times \ln(Xi) + a_{2i}] \quad (39)$$

$$b= \prod_{i=1}^{6} [b_{1i} \times \ln(Xi) + b_{2i}] \quad (40)$$

Sendo:

a e b – coeficientes que dependem dos módulos de deformabilidade e das espessuras das camadas do pavimento;
X_i – propriedade dos pavimentos, nomeadamente a espessura e o módulo de deformabilidade, Tabela 8;
a_{ij} e b_{ij} – coeficientes que dependem da Tabela 9.

i	X_i	Mínimo	Máximo
1	Espessura da camada fendilhada (m)	0.10	0.25
2	Espessura da camada granular (m)	0.20	0.40
3	Módulo de deformabilidade da camada de reforço (MPa)	2000	10000
4	Módulo de deformabilidade da camada fissurada (MPa)	2000	3500
5	Módulo de deformabilidade da camada granular (MPa)	150	450
6	Módulo de deformabilidade do solo de fundação (MPa)	50	150

Tabela 8 - Definição da sequência de propriedades do pavimento

i	a_{1i}	a_{2i}	b_{1i}	b_{2i}
1	$-1{,}038\times10^{-4}$	$-1{,}446\times10^{-1}$	$7{,}169\times10^{-3}$	$1{,}314\times10^{-1}$
2	$2{,}777\times10^{-1}$	$-4{,}022\times10^{0}$	$9{,}773\times10^{-5}$	$-6{,}368\times10^{-1}$
3	$-1{,}173\times10^{0}$	$1{,}212\times10^{1}$	$-4{,}946\times10^{-1}$	$7{,}069\times10^{0}$
4	$1{,}281\times10^{0}$	$5{,}070\times10^{-1}$	$3{,}923\times10^{-2}$	$2{,}641\times10^{0}$
5	$-5{,}160\times10^{-1}$	$6{,}964\times10^{0}$	$3{,}265\times10^{-2}$	$-1{,}287\times10^{0}$
6	$-1{,}774\times10^{-1}$	$2{,}385\times10^{0}$	$1{,}875\times10^{-3}$	$-8{,}167\times10^{-1}$

Tabela 9 - Coeficientes estáticos

O valor da extensão da camada de reforço é obtido segundo a equação (Sousa, Pais, Saim, & Way, 2002):

$$\varepsilon_{VM}\left(1\times10^{-6}\right) = a \times [\text{espessura do reforço (m)}]^{b} \quad (41)$$

Para completar esta metodologia de dimensionamento determina-se o número total de eixos padrão de 130 kN que a camada de reforço tem capacidade de sustentar (Sousa, Pais, Saim, & Way, 2002). Para misturas betuminosas convencionais, segue-se a seguinte equação:

$$NAEP = 6{,}4467 \times 10^{19} \left[\varepsilon_{VM}\left(1\times10^{-6}\right)\right]^{-5{,}93} \quad (42)$$

Para misturas betuminosas com borracha:

$$NAEP = 4{,}1245 \times 10^{19} \left[\varepsilon_{VM}\left(1\times10^{-6}\right)\right]^{-4{,}9761} \quad (43)$$

O número de eixos padrão que a camada de reforço tem capacidade de sustentar até o aparecimento da fissuração adotada no dimensionamento, é multiplicado pelo fator FAF de modo a ter em conta o grau de fendilhamento aceitável (Sousa, Pais, Saim, & Way, 2002).

De forma a facilitar este dimensionamento, (Sousa, Pais, Saim, & Way, 2002) desenvolveram um programa automático, designado de "*Reflective Cracking Overlay Design*", no qual são introduzidas as condições do pavimento e das temperaturas do local gerando um gráfico que, combinado com o tráfego em causa, devolve a espessura mínima de reforço necessária para controlar o grau de fendilhamento indicado.

CAPÍTULO 3

MISTURA BETUMINOSA COM ADIÇÃO DE RAR

3.1. DESCRIÇÃO GERAL DE MISTURAS BETUMINOSAS

Mesmo nos países em desenvolvimento, a maioria dos pavimentos rodoviários, sobretudo em áreas urbanas, têm camadas superiores betuminosas (Branco, Pereira, & Santos, 2011), constituídas por misturas que integram, aproximadamente, 95 % de agregados e 5% de ligante betuminoso e ar, variando naturalmente as suas propriedades com as respetivas proporções.

Consoante a granulometria e a percentagem ligante presente na mistura betuminosa, esta pode ser classificada em função da sua porosidade (V_v) em misturas "abertas", "semi-densas" e "densas" (Batista, 2004).

Por norma as misturas betuminosas a quente são utilizadas na execução de pavimentos flexíveis, sendo a sua utilização mais comum a construção de estradas. O processo de aplicação requer o aquecimento do ligante e dos agregados a uma temperatura significativamente superior à temperatura ambiente, tanto para a mistura dos materiais, como para a execução em obra.

Existem, contudo, misturas betuminosas a frio, pouco utilizadas em Portugal, que não requerem exposições dos materiais a elevadas temperaturas podendo ser aplicados à temperatura ambiente (Neves, n.d.), mas que não abordaremos nesta dissertação.

Em Portugal, a expressão mistura betuminosa a quente emprega-se maioritariamente a quase todo o tipo de misturas betuminosas produzidas para obras de pavimentação, desde as argamassas betuminosas, fabricadas apenas com materiais granulares finos, filer e betume, até aos macadames betuminosos, nos quais os agregados grossos assumem o papel mais predominante no comportamento da mistura (Cepsa, 2006).

Esta dissertação, tal como passou a ser recorrente nas obras públicas rodoviárias portuguesas, por defeito, observa os métodos de ensaio preconizados no Caderno de Encargos Tipo da Estradas de Portugal (CEEP, 2014), observando-se, também, as normas portuguesas e especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Garantidas as características físicas exigíveis aos agregados e antes de qualquer estudo de composição da mistura betuminosa, é necessário obter um material granular cuja curva granulométrica esteja dentro do fuso especificado pelos cadernos de encargos e apresente uma forma que acompanhe o andamento geral deste (Picado Santos, 2001).

Com a curva granulométrica dos agregados estabelecida pode iniciar-se o ensaio de Marshall. Este ensaio empírico consiste numa avaliação laboratorial que fornece indicações sobre a quantidade ótima de betume a ser utilizada em misturas betuminosas a quente. Permite, também, determinar a estabilidade e a fluência de misturas betuminosas (Neves, n.d.), sendo que a estabilidade de Marshall consiste na resistência máxima à compressão radial, apresentada pelo provete de ensaio quando moldado e ensaiado conforme o processo estabelecido, expressa em kN. Já a fluência de Marshall resume-se à deformação total apresentada pelo provete, desde a aplicação da carga inicial nula até à aplicação da carga máxima, expressa em mm (EN 12697-34, 2004).

A percentagem "ótima" de betume será obtida através da média dos valores das percentagens de betume que conduz ao valor máximo da baridade da mistura betuminosa, ao valor médio dos limites da porosidade, ao valor máximo associado à estabilidade de Marshall e ao valor médio dos limites da deformação de Marshall (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Dado o método de Marshall apresentar alguns inconvenientes, para as obras com suficiente relevância, a EP preconiza um estudo complementar de caracterização mecânica, onde sejam realizados ensaios de pista (*Wheel Tracking* – NLT 173/84), de resistência à fadiga (ensaios

de flexão em 4 pontos – EN 12697-24) e de sensibilidade à água (EN 12697-30) (Picado Santos L. , 2013).

3.1.1. Avaliação das deformações permanentes

Em Portugal, a avaliação laboratorial mais comum para a avaliação da resistência à deformação permanente em pavimentos betuminosos é o ensaio de pista ou *Wheel Tracking* para verificar os efeitos de repetidas cargas rolantes sobre lajes das misturas betuminosas sob análise (Consulpav L. , 2009).

O ensaio de pista (*Wheel Tracking*) segue a norma espanhola NLT 173/84 – *Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio*. Este ensaio baseia-se no deslocamento contínuo, de uma roda de borracha com características iguais às exigidas pela norma, ao longo de uma linha para trás e para a frente sobre as lajes de misturas betuminosas (Gardete, Picado-Santos, Pais, & Luzia, 2008) (Sousa, Fonseca, Freire, & Pais, 1999).

3.1.2. Resistência à fadiga

O fendilhamento é uma das principais degradações de um pavimento rodoviário flexível e caracteriza-se pela abertura de pequenas e/ou grandes fendas à superfície. Por norma, estas fendas originam-se na parte inferior das camadas betuminosas e prolongam-se até à superfície do pavimento.

A caracterização de misturas betuminosas quanto à sua resistência à fadiga é, geralmente, efetuada com base no mesmo tipo de ensaios laboratoriais (Batista, 2004). Por norma é utilizado o ensaio de flexão em quatro pontos, simulando o aparecimento de fendas por fadiga devido à deformação de tração que se desenvolve na face inferior das camadas betuminosas.

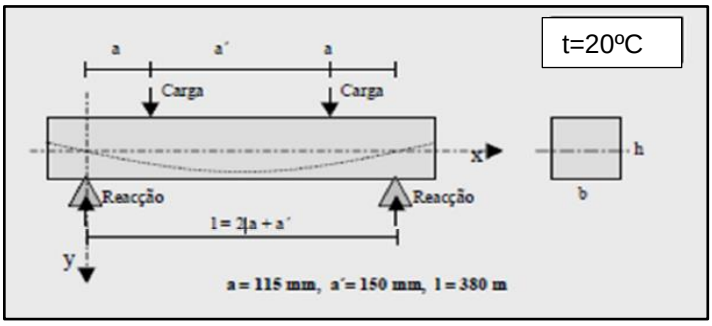


Figura 10 – Exemplo do esquema de ensaio à flexão em 4 pontos (Sousa, Fonseca, Freire, & Pais, 1999)

Este tipo de ensaio segue os requisitos exigidos pela norma europeia EN 12697-24, que descreve os procedimentos necessários para a avaliação da resistência à fadiga.

Norma Europeia 12697-24		
Provetes Prismáticos	Dimensões (mm)	Função da dimensão máxima do agregado utilizado na mistura betuminosa
	Nº de Provetes	18 (mínimo)
Condições de Ensaio	Ciclos de carga inicial	100
	Frequência (Hz)	0 - 60
	Temperatura de ensaio (ºC)	0 - 20

Tabela 10 – Exigências para a avaliação da resistência à fadiga de uma mistura betuminosa (EN 12697-24)

3.1.3. Sensibilidade à ação da água

A resistência das misturas betuminosas à ação da água é uma característica importante no desempenho e durabilidade das misturas betuminosas, em especial, das aplicadas na camada de desgaste. A sensibilidade à água é uma propriedade das misturas betuminosas para a qual estão habitualmente estabelecidos valores mínimos a cumprir nos Cadernos de Encargos de acordo com o método de ensaio utilizado para a sua avaliação.

A água pode, grosso modo, dar origem a dois tipos de degradações: numa primeira instância, contribui para a perda de adesividade entre o betume e os agregados, numa segunda fase, origina uma perda de coesão com perda de resistência do próprio betume.

Em Portugal, a avaliação desta propriedade observa a Norma EN 12697-12 preconizando o cálculo do Índice de Resistência Conservada (ITSR) correspondente ao quociente entre as resistências à tração indireta média dos provetes condicionados (ITS_w) e sem condicionamento (ITS_d).

A diferença entre os dois grupos de provetes consiste no ambiente a que estão sujeitos. O primeiro é designado por grupo seco (ITS_d), acondicionado ao ar em ambiente a 20ºC, e o segundo por grupo imerso (ITS_w), com os provetes imersos em água nas condições especificadas na norma.

Os dois grupos são sujeitos ao ensaio de determinação da resistência à tração indireta a uma temperatura de 15ºC, calculando-se a resistência à tração indireta pela seguinte relação:

$$ITSR = \frac{ITSw}{ITSd} x100\ (\%) \tag{44}$$

Por regra é pretendido um ITSR mínimo de 80 % (CEEP, 2014).

3.2. MÉTODO PROPOSTO PARA A FORMULAÇÃO DE MISTURAS DESCONTÍNUAS (I-MIX DESIGN)

Recentemente, com base num significativo estudo experimental, foi desenvolvida uma nova abordagem relativa à forma como é pensada e realizada a formulação de misturas betuminosas a nível nacional e internacional (Miranda H. , 2016). O estudo permitiu o desenvolvimento de novos conceitos (sob patente) que permitem, conjuntamente, o desenvolvimento de um novo método integrado de formulação e o controlo de qualidade de misturas betuminosas descontínuas, metodologia essa que se descreve seguidamente e se apresenta no Anexo: AVIII.1.

Tendo em consideração as características dos materiais utilizados na mistura betuminosa, o método visa permitir ao utilizador a otimização do volume de partículas ativas a utilizar para se obter um efeito de "*stone-on-stone*". O volume de vazios resultante do esqueleto pétreo criado pelas partículas ativas (agregados grossos) corresponde ao volume que o utilizador tem disponível para preencher com mástique betuminoso (partículas passivas, filer, aditivos estabilizantes, betume e vazios), como se apresenta na Figura 11 (Miranda H. , 2016).

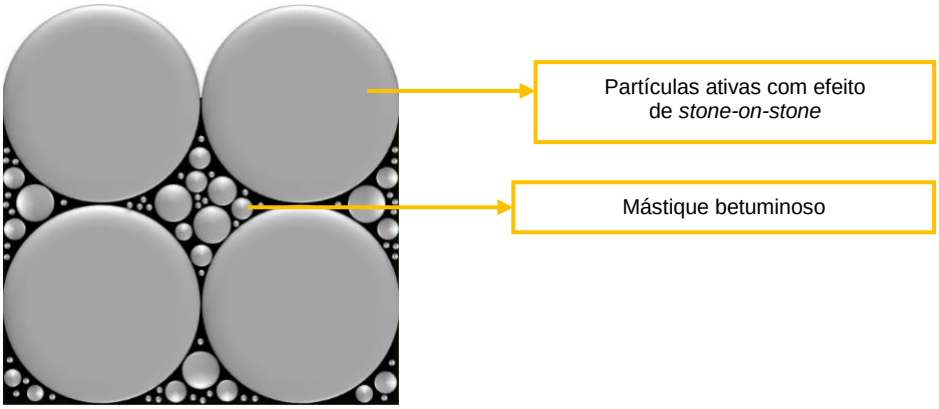


Figura 11 – Partículas ativas e mastique betuminoso (Miranda H. , 2016)

Complementarmente à otimização do volume de partículas ativas, o método visa ainda otimizar o volume de mástique betuminoso, através de três novos conceitos: "*mastic-within-stone*", o qual pretende agrupar a otimização do desempenho mecânico ("*mix-skeleton*", novo conceito) e do desempenho funcional ("*tire-on-stone*", novo conceito), assim como a obtenção de uma trabalhabilidade adequada ["*free binder*", conceito especificado na Austrália (QDMR (2010)]. Na Figura 12 apresentam-se os conceitos desenvolvidos e sua interligação no método que se apresenta (Miranda H. , 2016).

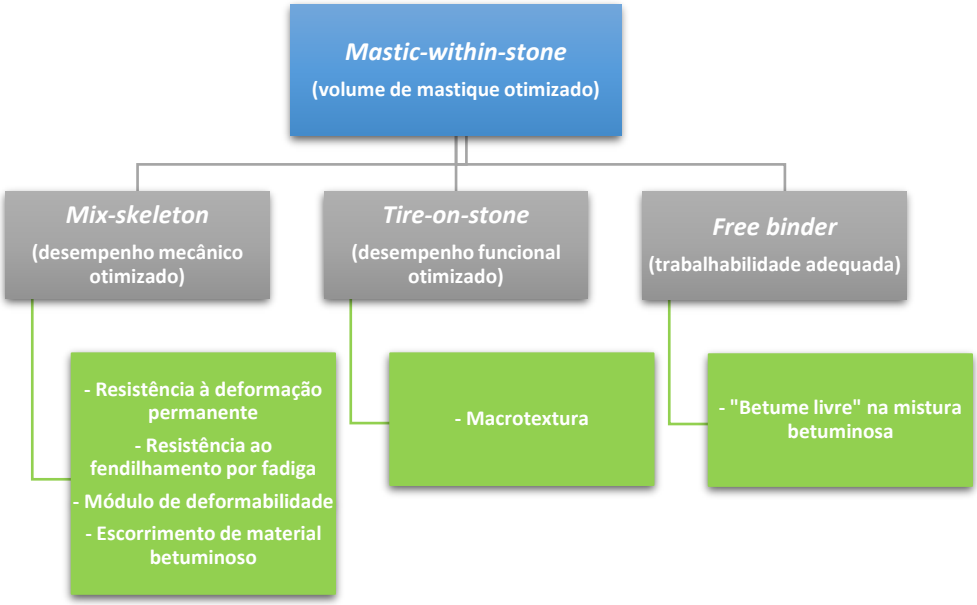


Figura 12 – Conceitos desenvolvidos e sua interligação no método inventado por (Miranda H. , 2016)

O conceito de *mix-skeleton* visa contribuir para que a definição da composição do mástique betuminoso (*mastic-within-stone*) a utilizar na mistura SMA, permita a obtenção de uma mistura betuminosa estruturalmente otimizada. Assim, o conceito de *mix-skeleton* pretende permitir ao utilizador, aquando da definição da composição do mástique betuminoso, compreender quais as consequências da variação da sua composição, no que concerne à: resistência à deformação permanente, resistência ao fendilhamento por fadiga, assim como no módulo de deformabilidade da mistura betuminosa descontínua tipo SMA e escorrimento de material betuminoso (Miranda H. , 2016).

Complementarmente ao desempenho mecânico, é fundamental que uma mistura betuminosa (quando aplicada como camada de desgaste) apresente um comportamento funcional adequado.

Entre as características funcionais pode-se considerar como fundamentais uma adequada macrotextura e resistência à derrapagem. Nesse âmbito o método considera ainda o conceito desenvolvido de *tire-on-stone*, que visa contribuir para que a definição da composição do mástique betuminoso (realizada em simultâneo com a obtenção do efeito de *mix-skeleton*) não condicione a macrotextura ou resistência à derrapagem da mistura SMA em serviço, privilegiando-se o contacto entre os rodados dos veículos e as partículas ativas ("agregados grossos") ao invés do contacto com o mástique betuminoso (Miranda H. , 2016).

A aplicação de uma mistura betuminosas descontínua do tipo SMA com um desempenho (mecânico e funcional) otimizado pode, contudo, ser comprometida por uma trabalhabilidade desadequada; assim considerou-se ainda como pressuposto a sua avaliação através da aplicação do conceito de *free binder*.

3.2.1. Contributos do método de formulação i-Mix Design

O *i-Mix Design,* desenvolvido por (Miranda H. , 2016), contribui de forma inovadora para um acesso transversal, de toda a comunidade, a um método de formulação das misturas tipo SMA e previsão do respetivo desempenho em obra reduzindo significativamente a necessidade de fabrico de provetes da mistura em laboratório pois, considerando os materiais disponíveis e apenas com base numa aplicação informática, permite a um utilizador definir a mistura com características volumétricas, desempenho e trabalhabilidade otimizadas (Miranda H. , 2016).

Dessa forma o i-Mix Design contribui para que:

Administrações rodoviárias:

- Possam reduzir o número de intervenções de manutenção/conservação necessárias, através do aumento da durabilidade das misturas SMA, permitindo uma poupança significativa nas estradas onde essas misturas sejam aplicadas.

  A nível internacional, de acordo com a *European Asphalt Pavement Association* (EAPA), entre 1995 e 2009, foram aplicadas misturas SMA numa área de cerca de 1.736 milhões de m^2, num investimento de cerca de 15,6 biliões de euros. Se considerarmos que, em média, uma SMA tem uma durabilidade mínima de cerca de 15 anos (EAPA, 2007) e se, por hipótese, admitirmos que essa durabilidade possa ser estendida um ano, a poupança envolvida poderia ter sido, desde 1995, de aproximadamente de 1 bilião de euros;

- disponibilizar informação útil para a adequada definição, nos seus cadernos de encargos e documentos de aplicação, das propriedades das misturas a utilizar, baseadas na otimização do seu desempenho, em função da camada onde se irá aplicar a mistura SMA e dos materiais (agregados, filer, betume e aditivos) disponíveis em cada país.

Projetistas, fiscalização e construtores:

- disponibilizar uma ferramenta (método/software) passível de, na fase de estudo, fornecer informação útil quanto aos materiais a utilizar e se os mesmos são conciliáveis com as propriedades definidas pelas administrações rodoviárias para determinada obra. Na fase de execução e fiscalização da obra, permitir a definição de critérios de aceitação/rejeição das misturas SMA aplicadas, baseados nas propriedades de desempenho previamente definidas na fase de formulação.

Laboratórios de Pavimentação:

- reduzir de forma acentuada a necessidade de complexos equipamentos de laboratório, de experimentadores especializados, assim como do custo e tempo de execução de um estudo de formulação e avaliação do desempenho de uma mistura do tipo SMA. Tal possibilita uma maior disponibilidade de tempo aos engenheiros e experimentadores para execução de outras atividades, nomeadamente de investigação, promovendo um aumento da rentabilização do investimento realizado num laboratório. Melhoria da segurança e higiene no trabalho através da promoção de um ambiente menos poluído no laboratório.

Engenharia Civil/Sociedade:

- cumprimento das metas mundiais definidas na Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas realizada em Paris em 2015, para a redução da utilização de recursos naturais e das emissões de CO_2. Para o exemplo anterior (aumento da durabilidade em um ano) a redução da utilização de recursos naturais corresponderá a uma poupança de cerca de 10 milhões de toneladas de agregados e de 1 milhão de toneladas de betume, o equivalente a uma redução de cerca de 6% nas emissões de CO_2 aquando do fabrico e aplicação das misturas SMA.

Comunidade Científica:

- promover a inovação através da otimização das misturas betuminosas existentes, assim como promover a redução dos custos no desenvolvimento de novos materiais/aditivos para o fabrico de novas misturas do tipo SMA com maior durabilidade.

  No Anexo: AVIII.2, é apresentada uma síntese do contributo dado com o método desenvolvido comparativamente, ao método de formulação *Marshall* normalmente utilizado a nível nacional e internacional.

3.3. CONSTITUENTES DAS MISTURAS BETUMINOSAS

Os elementos sólidos das misturas betuminosas são os agregados, betume e, em casos específicos, poderão ser adicionados aditivos para o aprimoramento das suas características, tais como fibras, borracha, polímeros ou RAR.

Os materiais utilizados devem estar em conformidade com a NP EN 13108-1 (EN13108-1, 2016).

3.3.1. Agregados

O agregado pode ser um material granular natural, artificial ou reciclado. O agregado natural tem natureza mineral e o artificial resulta de processos industriais. O reciclado provém da reutilização de materiais já usados anteriormente (CEEP, 2014).

Os agregados representam a maior parte do volume nas misturas betuminosas, por esse motivo têm grande influência no seu desempenho. As diferentes granulometrias de agregados formam um esqueleto pétreo, que tem obrigação de resistir à ação do tráfego. Dado que os agregados grossos (2 a 45 mm) garantem estabilidade e aumentam a resistência mecânica, os agregados finos (0,063 a 2 mm) permitem que a mistura betuminosa obtenha melhor compacidade e o filer (<0,063 mm) permite que a mistura tenha uma melhor impermeabilidade (Silva H. , 2005).

A NP EN 13043 especifica os agregados que devem ser utilizados nas misturas betuminosas. Cada caderno de encargos estabelece as características mínimas exigíveis aos agregados para poderem ser usados em determinadas misturas betuminosas, tais como a distribuição

granulométrica, resistência das partículas à fragmentação, forma e o teor de finos (LNEC, 2013).

No que respeita à granulometria, esta é determinada através da peneiração do agregado seco através de uma série de peneiros com malhas de abertura progressiva decrescente, de acordo com as normas NP EN 933-1 e NP EN 933-2 (LNEC, 2013), dando a curvas granulométricas consoante a percentagem de agregados retida em cada peneiro. Estas curvas consistem na relação entre a percentagem de material passado em cada peneiro com o logaritmo da abertura do peneiro.

Consoante a distribuição da granulometria dos respetivos agregados, as misturas betuminosas podem ser classificadas em contínuas (densas), abertas, descontínuas ou uniformes (Bernucci, Motta, & Ceratti, 2008).

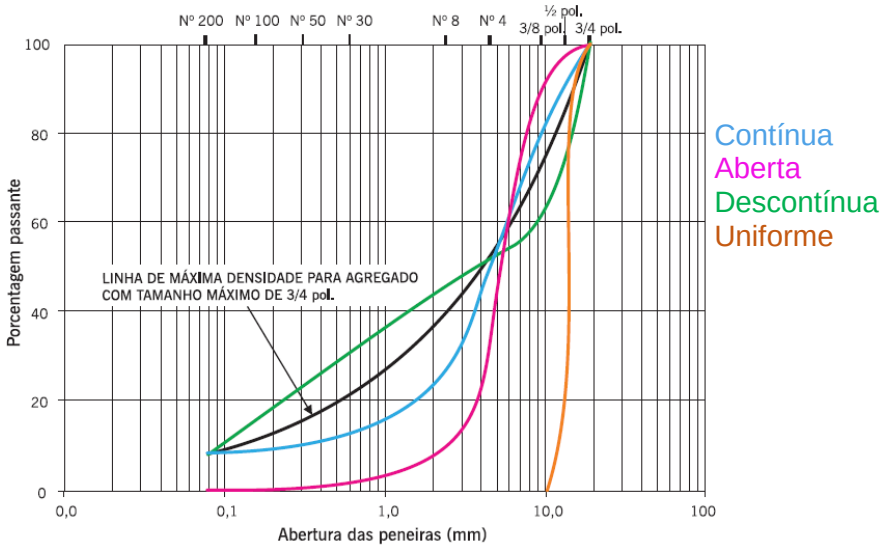


Figura 13 – Representação de curvas granulométricas (Bernucci, Motta, & Ceratti, 2008)

Outra característica importante a ser verificada nos agregados das misturas betuminosas consiste na resistência ao choque, ao atrito entre partículas e ao desgaste provocado pelo tráfego.

A resistência à fragmentação é medida segundo a NP EN 1097-2, através do ensaio de *Los Angeles* (LNEC, 2013) com a colocação do material junto com esferas de aço num recipiente em aço, que roda até fragmentar o material. Por outro lado, a resistência ao desgaste é medida com o ensaio *Micro-Deval* (NP EN 1097-1) colocando o material granular no interior de quatro cilindros ocos em aço inoxidável submetidos a rotação.

Ambos os ensaios consideram o material fragmentado ou desgastado quando já passa no peneiro de 1,6 mm (Palha, 2008).

Quando os agregados se destinam à camada de desgaste deve ser realizado um ensaio ao Polimento Acelerado que se rege pela NP EN 1097-8. Este ensaio quantifica a perda de rugosidade superficial devida à passagem sucessiva dos veículos, ou seja, o objetivo essencial deste ensaio baseia-se em conferir o coeficiente de atrito após a aplicação da camada de desgaste.

As partículas dos agregados devem ter forma aproximadamente cúbica e serem rugosas para apresentarem maior resistência e melhor aderência com o ligante betuminoso, características essas aferidas pelo índice de achatamento (NP EN 933-3), pelo índice de forma (NP EN 933-4) e pela percentagem de superfícies esmagadas (NP EN 933-5) (LNEC, 2013).

Por fim, os agregados devem apresentar-se limpos, não contendo impurezas como argilas, matérias de natureza orgânica, materiais que reajam à água e excesso de finos. Tudo isto, pode ter uma influência prejudicial na aderência entre o agregado e o ligante betuminoso. A medição de limpeza do material pode ser realizada por dois ensaios, o ensaio de determinação do Azul de Metileno de acordo com a NP EN 933-9 e o ensaio de Equivalente de Areia conforme a NP EN 933-8 (LNEC, 2013). Ambos os ensaios quantificam a quantidade de material fino e argila presente no agregado, sendo o agregado rejeitado caso as quantidades em causa excedam os limites máximos da norma.

Propriedade	Normas	Unid.	Tipo de Mistura			
			AC14 surf (BB	AC10 surf (mBBr)	AC 14 surf (BBr)	MBR-BBA
Forma do agregado grosso – Índice de achatamento	NP EN 933-3	-	FI_{20}	FI_{15}		
Percentagens de superfícies esmagadas e partidas nos agregados grossos	NP EN 933-5	%	$C_{100/0}$			
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente de Los Angeles	NP EN 1097-2	%	LA_{20}			
Resistência ao desgaste por atrito do agregado grosso, coeficiente Micro-Deval	NP EN 1097-1	%	$M_{DE}15$			
Resistência ao polimento do agregado grosso para camadas de desgaste	NP EN 1097-8	%	PSV_{50}			
Massa volúmica das partículas	NP EN 1097-6	Mg/m^3	A declarar			
Absorção de água	NP EN 1097-6	%	≤ 1			

Tabela 11 – Valores mínimos exigidos aos agregados das misturas betuminosas a quente para camadas de desgaste (CEEP, 2014) e NP EN 13043

3.3.2. Ligantes betuminosos – betumes

O ligante betuminoso (betume, asfalto ou alcatrão) é indispensável numa mistura betuminosa ligando os agregados e fornecendo coesão e estabilidade à mistura não podendo ser confundido com ligantes hidráulicos, como o cimento.

O betume, de longe o mais importante ligante betuminoso, é composto por uma mistura natural de líquidos orgânicos, sendo altamente viscoso. É um produto provindo da destilação de carvão ou de petróleo bruto, de cor castanho-negro, contendo uma complexa variedade de hidrocarbonetos de diferentes massas moleculares (Suprimentos, n.d). É formado em média por 80 a 85 % de carbono, 10 a 15% de hidrogénio, 2 a 3% de oxigénio e por hidrocarbonetos (produtos obtidos na destilação do petróleo).

A oxidação lenta provocada pelo oxigénio atmosférico e pela água das chuvas podem provocar alterações nos betumes devido ao processo de envelhecimento, embora tenham baixa reatividade química a muitos agentes.

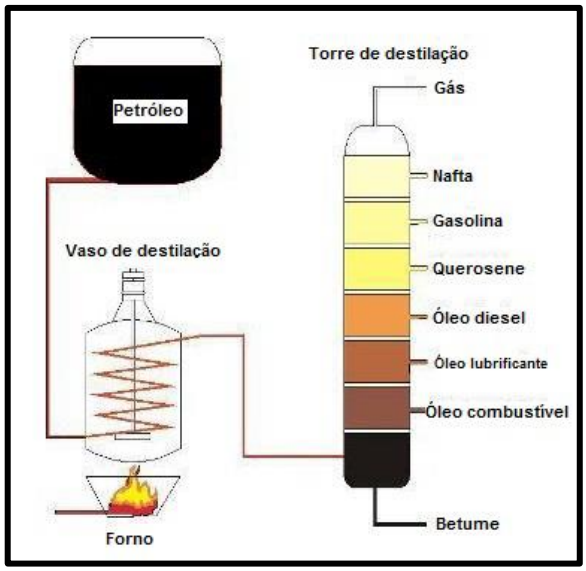


Figura 14 - Destilação fracionada do petróleo bruto (Alves, n.d)

A rigorosa análise das propriedades e composição do betume, que é quimicamente bastante complexo, além de dispendiosa, gera informação desnecessária à maioria das suas utilizações. Por essa razão, os betumes são separados em dois grupos químicos: os asfaltenos e os maltenos, divididos estes últimos em resinas, saturados e aromáticos. Cada um destes grupos torna-se importante para que se possa compreender melhor a composição, estrutura e reologia do betume.

Em síntese, o betume é considerado um sistema coloidal em que micelas de elevado peso molecular, os asfaltenos, estão afastadas num meio dispersante, oleoso e de menor peso molecular, os maltenos (Fontes, 2009).

Os asfaltenos são sólidos amorfos, apresentam uma tonalidade escura e, para além de carbono e hidrogénio, contêm algum nitrogénio, enxofre e oxigénio. Constituindo 5 a 25% dos betumes, são considerados materiais de peso molecular relativamente elevado, tanto que, as características reológicas do betume são afetadas precisamente por este tipo de materiais, quanto maior for a fração de asfaltenos mais duro será o betume.

As resinas, tal como os asfaltenos, são compostas por hidrogénio e carbono e, em menores quantidades, por oxigénio, enxofre e nitrogénio. Apresentam uma coloração castanha escura, são sólidas ou semissólidas e muito polarizadas, o que as tornam muito adesivas. Funcionam como agentes dispersantes para os asfaltenos.

Os saturados são óleos viscosos não polarizados de nuance branca ou creme. São constituídos por hidrocarbonetos asfálticos, predominantemente leves e constituem 5 a 20% do betume.

Os aromáticos constituem 40 a 65 % do betume e apresentam uma coloração escura. São compostos por componentes aromáticos como nafténicos, que fazem parte do betume de peso molecular mais baixo e desempenham a maior proporção do meio dispersante dos asfaltenos.

Em Portugal os betumes para a pavimentação rodoviária, obtidos por processos de refinação do petróleo bruto, devem cumprir os requisitos exigidos pela NP EN 12591: Betumes e ligantes betuminosos – Especificações para betumes de pavimentação (EN 12591, 2009). Esta norma, especifica as propriedades e os respetivos métodos de ensaio pertinentes para a caracterização de ligantes betuminosos.

Propriedades		Normas	Unidades	Betume 35/50	Betume 50/70
Penetração, 25ºC		EN 1426	0,1 mm	35-50	50-70
Temperatura de Amolecimento (método anel e bola)		EN1427	ºC	50-58	46-54
Viscosidade cinemática, 135 ºC		NP EN 12595	mm^2/s	≥370	≥295
Solubilidade		NP EN 12592	%	≥99	
Temperatura de Inflamação		EN ISSO 2592	ºC	≥240	≥230
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento (RTFOT a 163 ºC, NP EN 12607-1)	Variação em massa	NP EN 12607-1	%	≤0.5	
	Índice de Penetração	EN 12591 Anexo A	-	]-1.5;0.7[	
	Penetração retida	EN 1426	%	≥53	≥50
	Temperatura de fragilidade de Fraass	EN 12593	ºC	≤-5	≤-8
	Aumento da temperatura de amolecimento	EN 1427	ºC	≤11	

Tabela 12 – Propriedades e métodos de ensaio dos betumes (CEEP, 2014)

A caracterização de betumes para pavimentação rodoviária é realizada através da determinação das propriedades que se relacionam com o comportamento mecânico do betume. Neste caso, a caracterização de betumes passa pela avaliação da penetração, temperatura de amolecimento, resiliência, viscosidade e avaliação do comportamento reológico (Branco, Pereira, & Santos, 2011) (Palit, Reddy, & Pandey, 2004).

A relação destas propriedades dos betumes e o respetivo comportamento mecânico podem ser conhecidas através de relações intuitivas.

O ensaio de penetração permite obter de forma indireta a viscosidade dos betumes, sendo que maior penetração está relacionada com betumes mais fluidos que permitem obter misturas betuminosas com maior módulo de deformabilidade. Este ensaio consiste na medição da profundidade, numa amostra de betume, através da penetração de uma agulha com dimensões e peso segundo a respetiva norma à temperatura de 25ºC durante 5 segundos. A nível Europeu, a classificação de betumes sucede-se a partir do valor da penetração a 25 ºC, sendo os tipos de betumes de pavimentação os seguintes: 10/20, 20/30, 35/50, 50/70, 70/100, 100/150, 160/220 e 250/330. Por exemplo, um betume 35/50 é um betume em que a agulha penetra entre 3,5 e 5 mm. Os betumes para a pavimentação rodoviária utilizados em Portugal são os betumes 35/50 e 50/70.

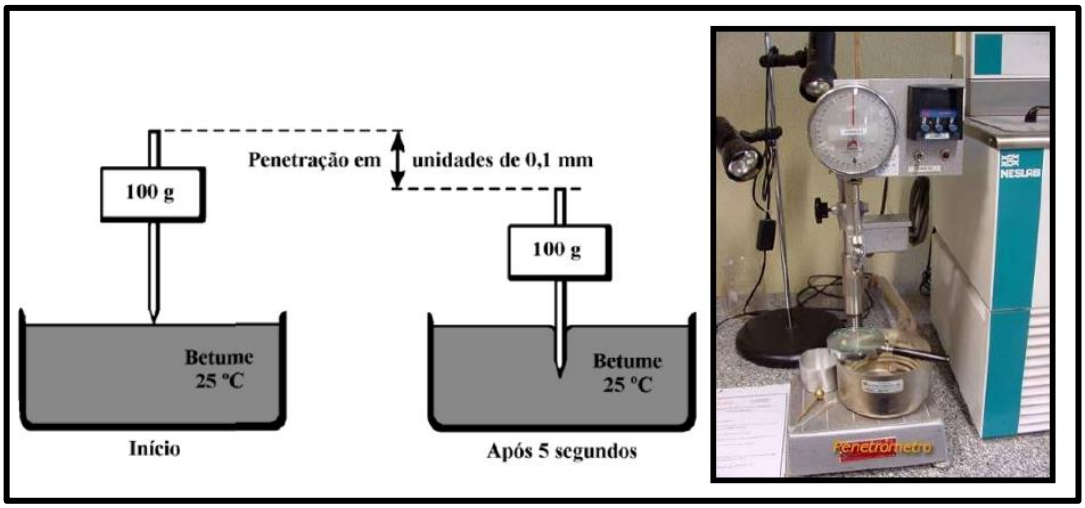


Figura 15 – Esquema do ensaio de penetração de betume e equipamento utilizado

A temperatura de amolecimento permite medir a deformabilidade do betume para elevadas temperaturas. Este ensaio baseia-se na colocação de uma esfera de aço, de peso especificado, sobre um provete de betume contida num anel de latão. Este conjunto é colocado sobre um recipiente com água que está sujeita a um aquecimento (5ºC/min). Com o aumento da temperatura o betume vai amolecendo e a esfera vai deformando a amostra, sendo registado a temperatura da água no instante em que o betume e a esfera tocam na base do suporte metálico.

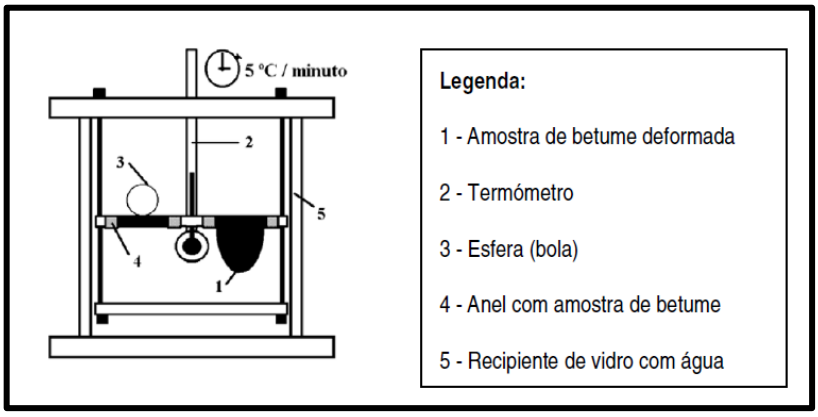


Figura 16 – Ensaio para determinação do ponto de amolecimento

A resiliência é uma propriedade relacionada com a aptidão da mistura betuminosa para resistir às deformações permanentes. O ensaio de resiliência consiste em aplicar a uma amostra de betume, a 25ºC, um deslocamento de 10 mm, por meio de uma esfera metálica medindo-se, em seguida, a recuperação elástica da amostra num determinado intervalo de tempo. O ensaio é efetuado segundo a especificação ASRM D 5329-96.

Figura 17 – Ensaio de resiliência e aspeto final das amostras

A viscosidade rotacional serve para medir a viscosidade a diferentes temperaturas. O ensaio com o viscosímetro Brookfield permite aferir a viscosidade do betume em estudo à temperatura desejada. A viscosidade rotacional é determinada medindo a torção necessária para manter constante a velocidade de rotação de um eixo cilíndrico, imerso numa amostra de betume. O valor da viscosidade do betume é uma propriedade importante pois é uma grandeza que permite avaliar se o betume possui fluidez suficiente que permita o seu bombeamento e a sua mistura com agregado. O ensaio é efetuado segundo a especificação Standard AASHTO TP 48 (a uma temperatura de 175 ºC).

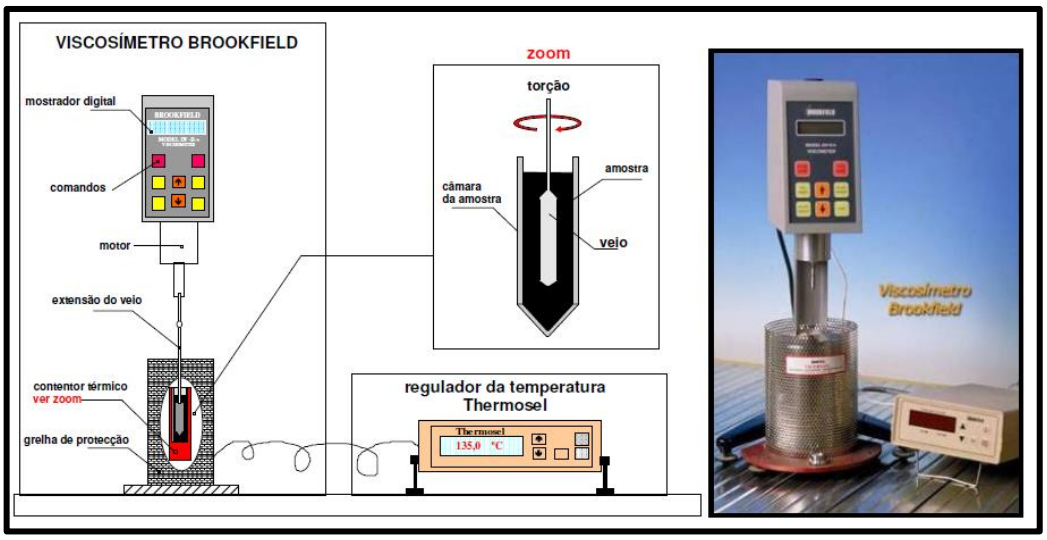


Figura 18 – Esquema e fotografia do Viscosímetro Rotacional

O betume a utilizar nas misturas betuminosas deve apresentar propriedades que permitam manter o seu desempenho perante as variações de temperaturas a que a mistura vai estar sujeita.

Dentro dos principais resultados do programa estratégico de pesquisa do *Strategic Highway Research Program* (SHRP) conta-se o método de projeto de mistura "*Superpave mix design*" para caracterização e seleção de betumes considerando também o tráfego e temperaturas extremas, mas dispensando alguns testes tradicionais (p.e., compactações do Marshall).

Para definir a "*performance*" (Grau PG) que um betume possui e para se poder avaliar se satisfaz, ou não, as exigências da obra em questão, o *Superpave* preconiza uma série de ensaios, efetuados às temperaturas mais altas e mais baixas passíveis de ocorrer em exploração.

O betume utilizado numa camada do pavimento apresenta uma determinada rigidez, que aumenta com o envelhecimento devido a fenómenos de oxidação do betume. Desta forma, a avaliação da resistência à deformação permanente é avaliada numa fase inicial da vida útil do pavimento. Em contrapartida, esse endurecimento, com o passar do tempo, torna a mistura mais rígida (com melhor comportamento às deformações permanentes) mas também mais frágil, tornando-se críticos os problemas do fendilhamento por fadiga (NHI, 2000).

Os ensaios *Superpave* quantificam a "*performance*" do betume em três estados da sua vida. O primeiro estado corresponde ao transporte, armazenamento e manuseamento. O segundo ocorre durante os processos de mistura e construção, sendo simulado em concordância com a especificação para envelhecimento do betume (NP EN 12607-1). Para este procedimento é utilizado ensaio pelo método de *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) que tem como objetivo principal produzir o endurecimento do betume, ou seja, aumenta a sua rigidez e viscosidade, e reduz a ductilidade e adesividade entre o betume e o agregado (Pellinem, Xiao, & Shah, 2008). O terceiro estado corresponde ao do envelhecimento do betume durante a sua utilização expondo-se as amostras de betumes a calor e a pressão simulando vários anos de envelhecimento de uso contínuo numa mistura de um pavimento flexível.

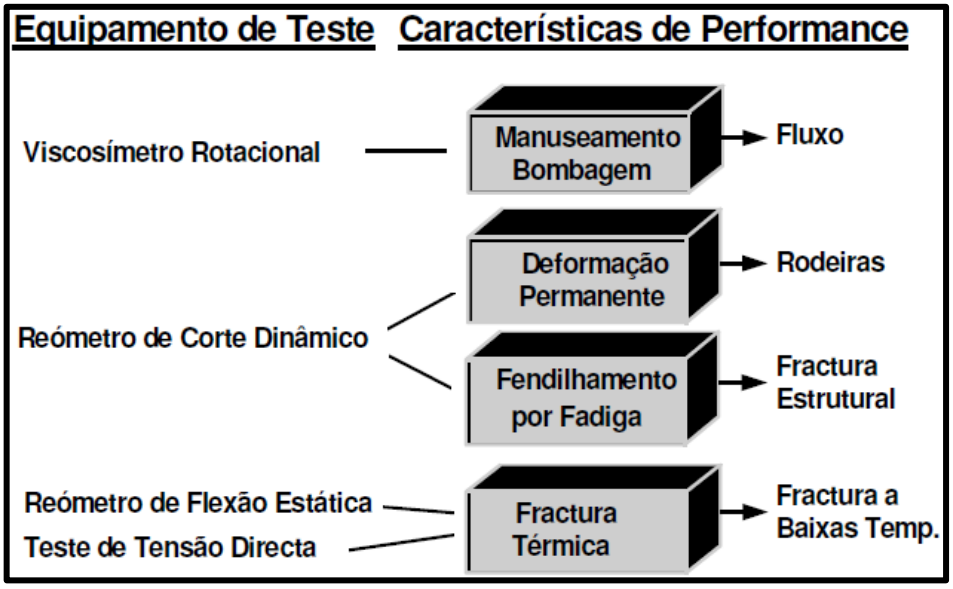


Figura 19 – Ensaios Superpave – equipamentos de testes utilizados, propósito e relação com a "*performance*"

Na caracterização de um ligante betuminoso deve também ter-se em conta a capacidade do betume recuperar das deformações que serão induzidas pelo tráfego. O ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR) permite verificar a tensão mais adequada à resistência à deformação permanente que um ligante betuminoso incute ao pavimento (Domingos & Faxina, 2016).

O conceito MSCR avalia a capacidade do betume para resistir à deformação permanente e a sua capacidade de recuperar da deformação imposta pelo tráfego. Consiste num ensaio de aplicação de ciclos sucessivos de carregamentos e descarregamentos numa amostra do ligante betuminoso. Durante 1 s é aplicada uma carga constante numa amostra de ligante betuminoso, removendo-a em seguida e permitindo a recuperação do material durante 9 s (Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, 2016). Segundo a norma ASTM D7405 este ciclo é repetido para dois níveis diferentes de tensão, 100 e 3200 Pa. A tensão menor corresponde a um tráfego leve, e a tensão maior a um tráfego pesado.

Através do MSCR obtêm-se duas propriedades, o J_{nr} mede a complacência não recuperável do ligante e o R mede o percentual de recuperação (Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, 2016). A

determinação das respetivas propriedades é obtida a partir da leitura de três deformações distintas na amostra do ligante betuminoso (ε_0, ε_c, ε_r).

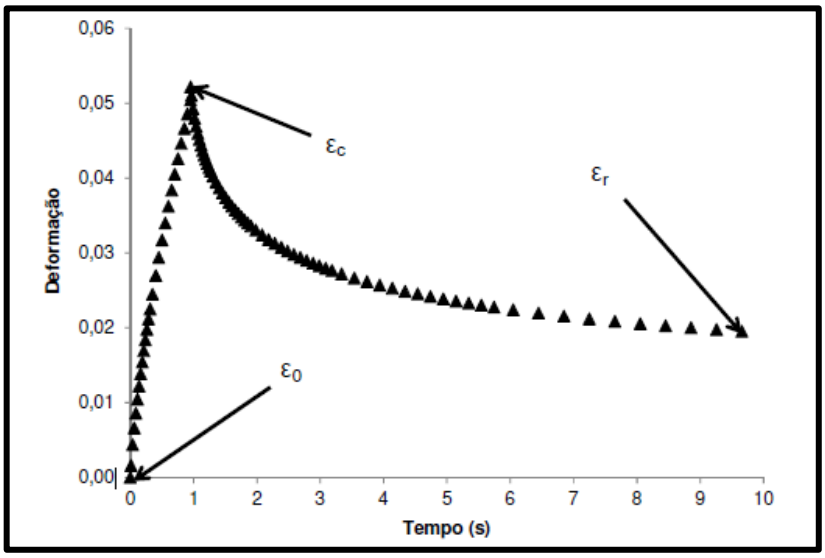


Figura 20 - Localização das deformações em um ciclo de fluência e recuperação do ensaio MSCR

Segundo a ASTM D7405, o valor de R está diretamente relacionado com a resposta comportamental que o ligante impõe quando sujeito a uma tensão. Quanto maior o R, melhor será a recuperação do ligante betuminoso no período de repouso, apresentando assim um comportamento muito mais elástico. Já quanto maior for o J_{nr}, menor é a capacidade do ligante betuminoso para recuperar as deformações sofridas pela ação do tráfego (Domingos & Faxina, 2016).

A permanente investigação, aprimorando o conhecimento do comportamento mecânico das misturas betuminosas, tem vindo a permitir a utilização de outros tipos de betumes, como por exemplo, os betumes modificados (Branco, Pereira, & Santos, 2011) com a adição de polímeros (elastómeros, termoplásticos e "termoendurecíveis"), enxofre, granulado de borracha e resinas.

A adição de polímeros aos betumes provoca, de uma maneira geral, uma melhoria das propriedades de um betume convencional, diminuindo a suscetibilidade térmica, ampliando o intervalo de plasticidade, oferecendo maior coesão, melhor resposta elástica, melhor resistência à sensibilidade à água e maior resistência ao envelhecimento.

Como alternativa aos aditivos termoplásticos e elastómeros tem vindo a ser utilizado granulado de borracha, proveniente de pneus em fim de vida útil, para modificar betumes, dando lugar aos já referidos BMB.

Tendo em conta não só a melhoria que os BMB trouxeram ao comportamento estrutural e funcional dos pavimentos betuminosos, mas também às dificuldades práticas encontradas à sua utilização, sobretudo pela via húmida, foi desenvolvida uma nova solução de muito mais fácil fabrico das misturas por simples adição de borracha reagida e ativada (RAR) como se tratasse de um inerte fino (Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, Advanced rheological characterization of Reacted and Activated Rubber (RAR) modified asphalt binders, 2016).

3.4. BORRACHA REAGIDA E ATIVADA (RAR)

A RAR pode ser caracterizada como um ligante betuminoso modificado com borracha, sendo composta por granulado de borracha de pequenas dimensões, por betume convencional e por filer comerciais, em percentagens devidamente otimizadas. Esta produção é conseguida a partir de uma mistura quente num curto período de tempo.

Numa primeira etapa, o granulado representativo da RAR é obtido a partir do aquecimento das partículas de borracha que, a uma determinada temperatura dá origem a uma reação que faz com que o granulado de borracha acabe por absorver o betume contido na mistura. Contudo, continuam abertos poros na borracha reagida por preencher, daí adicionar o filer, por exemplo, de calcário, que apresentam uma boa adesividade ao ligante asfáltico e ainda ostenta reduzidos custos de compra no mercado. Para que a mistura se torne menos suscetível à presença de água e melhorando a resistência à deformação permanente, sem que surja fissuração, e para complementar os poros abertos que a borracha reagida ainda apresenta é adicionado a cal hidráulica, um aglomerado ativo hidráulico.

Por norma, uma mistura típica de RAR contém cerca de 60% de granulado de borracha, 22% de betume convencional e 16% de filer comercial (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012). Após o arrefecimento da RAR é adicionado 10% de filer de cal hidráulica no reservatório para promover um melhor envolvimento de cada partícula de RAR.

Uma das vantagens da RAR concentra-se no facto de poder ser adicionada a qualquer tipo de mistura betuminosa. E dado que, as partículas de RAR já incorporam uma percentagem de betume, existe a possibilidade de substituir parte do betume a utilizar na mistura, segundo diferentes proporções.

Estudos de investigação, demonstram que as misturas betuminosas com RAR comparadas a outro tipo de misturas, até mesmo as misturas betuminosas com BMB, possuem um comportamento estrutural e funcional muito superior (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012).

A aplicabilidade da RAR numa mistura betuminosa modifica as suas propriedades, permitindo um acréscimo da temperatura de amolecimento, da resiliência, do grau PG e das propriedades de recuperação, na forma de que a RAR funciona como um extensor elastómero do betume (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012).

Para além das vantagens que as misturas betuminosas com RAR apresentam a nível da deformação permanente e fadiga, há evidência que demonstra que a sua relação custo/beneficio é bastante favorável.

Maioritariamente, a RAR tem sido produzida para estudos experimentais, sendo que para vários trabalhos de investigação foi fabricada e experimentada em diferentes formulações e proporções relativas aos seus quatro componentes.

3.4.1. Desempenho de betume modificado com RAR

As propriedades e comportamentos da RAR como ligante betuminoso modificado com borracha estão qualificadas em diversos estudos. Não existindo uma norma europeia específica para betumes modificados com RAR ou com borracha, considerou-se que o mais correto seria utilizar como referência a norma europeia EN 14023 para definir as diferentes categorias das propriedades do betume modificado com RAR.

Os critérios para estabelecer a percentagem de RAR adequada e o tempo e a temperatura de mistura são geralmente baseados em ensaios físicos realizados ao betume convencional (p.e., 35/50 ou 50/70) + RAR, adiante designado por betume combinado. Deste modo, para

que um betume seja bem caracterizado, é preciso avaliar algumas variáveis como o teor de borracha, o tempo de mistura e a temperatura, comummente, com base em ensaios físicos realizados no betume combinado, como a penetração a 25ºC, a temperatura de amolecimento, a resiliência, a viscosidade e o grau PG (Branco, Pereira, & Santos, 2011) (Kennedy, et al., 1994).

3.4.1.1. Propriedades do betume modificado com RAR

O granulado de borracha é o material predominante nas misturas que utilizam RAR e o constituinte que reage determinantemente com o betume convencional para modificar este último. Note-se assim que o aumento da percentagem de RAR permite que se obtenha uma redução no valor de penetração do ligante a 25ºC, verificando-se, portanto, que quanto maior a percentagem de RAR mais duro se torna o betume combinado.

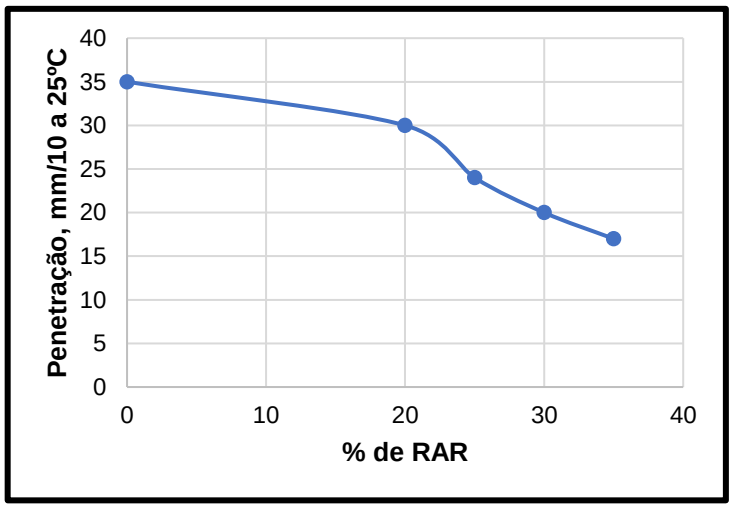


Gráfico 2 – Penetração do ligante betuminoso 35/50, 25ºC

O betume combinado exige maior temperatura que o convencional para ganhar idêntica plasticidade.

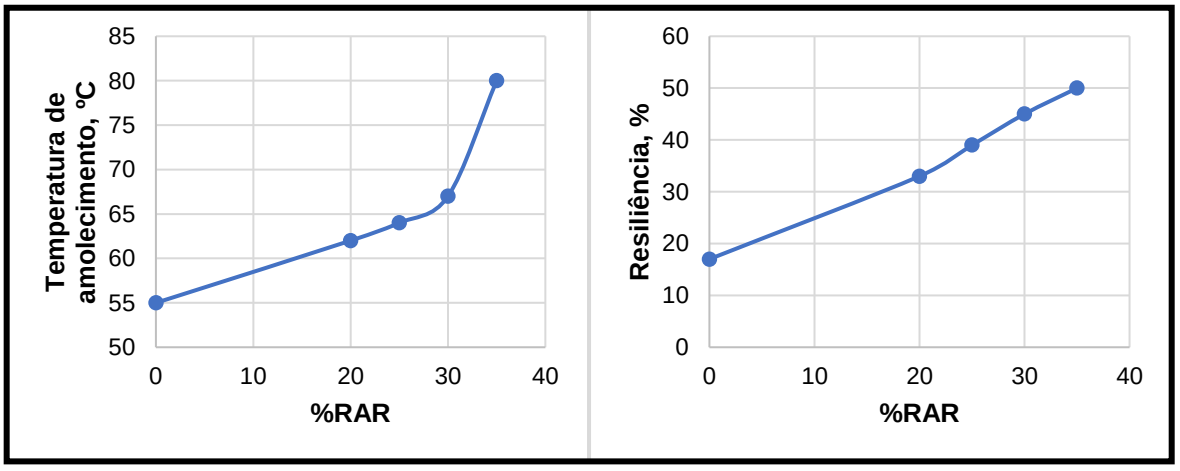


Gráfico 3 – Temperatura de amolecimento e Resiliência do ligante betuminoso 35/50

O betume combinado é também mais viscoso. Este acréscimo significativo de viscosidade, deve-se ao gel e ao inchamento das partículas de borracha (Pais & Pereira, 2007) condicionando o processo de produção do betume combinado, a trabalhabilidade e compactação da mistura betuminosa.

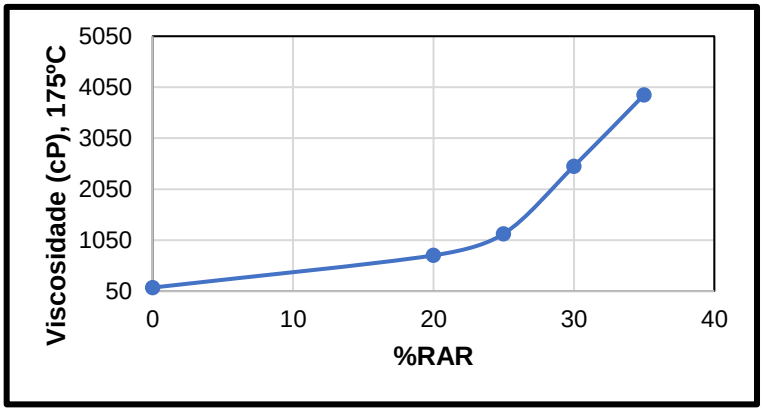


Gráfico 4 – Viscosidade do ligante betuminoso 35/50, 175ºC

A influência do tipo de betume verifica-se de uma forma mais significativa no comportamento da viscosidade, sendo preferível utilizar na produção das misturas com RAR um betume convencional mais mole (e.g., 50/70) do que um betume mais duro (e.g., 35/50), por permitir adição de maior quantidade de granulado de borracha.

3.4.1.2. Comportamento reológico do betume combinado

O principal objetivo do estudo reológico dos betumes é encontrar uma relação entre a deformação, tensão, duração de aplicação da carga e temperatura (Arieira, Maia, Pais, & Fonseca, 2006).

O comportamento reológico do betume influencia o desempenho das misturas betuminosas durante o processo da mistura, compactação e em serviço (Arieira, Maia, Pais, & Fonseca, 2006).

A consideração da temperatura é, nesse capítulo, um fator extremamente importante, atendendo a que os betumes são termo-sensíveis, com consistência variável com a temperatura. O comportamento elástico, viscoelástico e viscoso do betume depende da temperatura e do tempo de aplicação da carga (Arieira, Maia, Pais, & Fonseca, 2006).

Quando a temperatura é reduzida e/ou para tempos de carregamento curtos (ou elevadas frequências), o betume reage como um sólido elástico. Pelo contrário, quando a temperatura aumenta e/ou apresenta tempos de carregamento longos (ou baixas frequências), a viscosidade torna-se mais marcante.

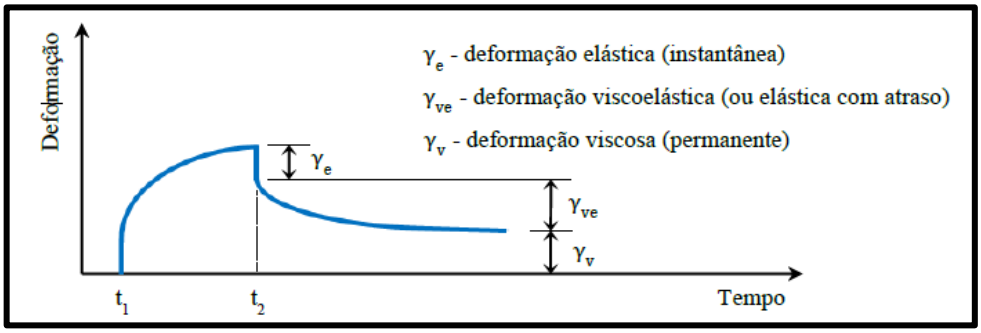


Figura 21 – Resposta de um ligante betuminoso a uma tensão constante aplicada num intervalo de tempo

Dado que o comportamento do betume depende quer do tempo de carga quer da temperatura, o ensaio ideal para os ligantes betuminosas deve incluir ambos os fatores. A relação entre estas duas características é usada para controlar a capacidade do ligante em resistir às deformações permanente e à fadiga. Para que o ligante betuminoso tenha capacidade de

suportar deformações permanentes, terá que que ter um comportamento elástico. Já para resistir à fadiga o ligante terá de ser elástico e flexível (NHI, 2000).

Visto que a RAR aumenta significativamente a viscosidade do betume combinado, permite assim, melhorar as características mecânicas das misturas betuminosas finais, entre elas, a redução da propagação de fendas, menor suscetibilidade térmica, maior durabilidade e maior resistência aos raios ultravioletas e infravermelhos, retardando o envelhecimento da mistura (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012) (Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, 2016).

O equipamento mais utilizado para efetuar ensaios ao comportamento reológico de betumes é o reómetro de corte dinâmico *Dynamic Shear Rheometer* (DSR). Este equipamento permite avaliar o comportamento viscoelástico do betume, quantificando o módulo de Corte Complexo (G^*) e o ângulo de fase (δ) do betume para uma determinada temperatura e frequência (NHI, 2000).

As componentes elásticas do módulo complexo ($G^*.\cos\delta$) e viscosa ($G^*.\sin\delta$) estão fortemente correlacionadas com a suscetibilidade das misturas betuminosas aos fenómenos de degradação à fadiga e à deformação permanente (Antunes, Giuliani, & Sousa, 2008).

Com o aumento da temperatura, o ligante betuminoso torna-se mais flexível, diminuindo assim a sua rigidez e reduzindo a resposta elástica (Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, 2016). Consequentemente, o ligante betuminoso apresenta uma resposta comportamental viscosa, para temperaturas mais elevadas, correspondendo a um aumento da magnitude do ângulo de fase (δ) e redução do módulo de corte complexo (G^*), como é observável na Figura 22.

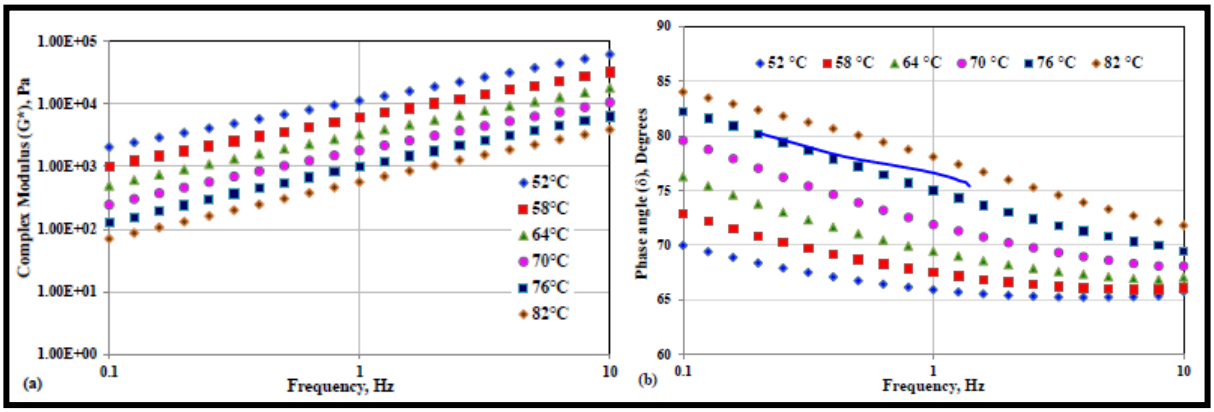


Figura 22 – Avaliação do comportamento visco-elástico do ligante betuminoso (Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, 2016)

Consoante a temperatura, os parâmetros G^* e δ variam regularmente com a frequência (tempo de carregamento) sob formas passíveis de obedecer a curvas mestras (Airey, 1997).

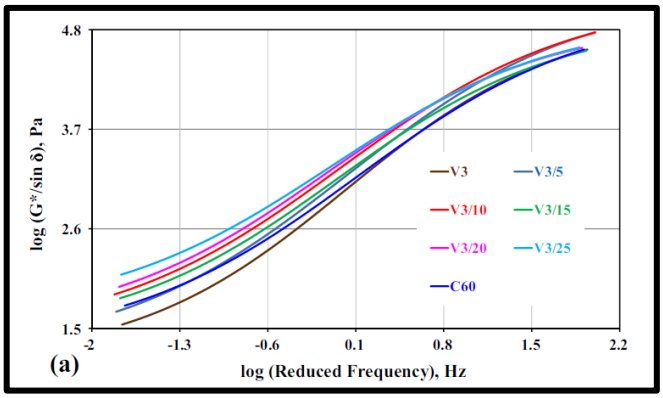


Figura 23 - Curva-mestra G*/sin(δ) (Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, 2016)

O efeito da frequência permite compreender melhor a resposta das velocidades impostas pelo tráfego ao pavimento, em conjunto com uma alternância das temperaturas. Por exemplo, frequências mais baixas e temperaturas mais elevadas são mais prejudiciais para o ligante betuminoso utilizado numa mistura, pois têm um maior potencial de ocorrência de deformação no pavimento rodoviário (Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, 2016). Portanto, as misturas que apresentem um maior parâmetro ($G^*/\sin\delta$) têm um comportamento de resistência à deformação permanente mais acentuado, ou seja, exibem uma resposta elástica mais alta.

Segundo a Figura 23, o acréscimo de RAR num betume convencional, produz um aumento no parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ em frequências baixas, indicando assim que a RAR permitirá obter uma melhoria na resistência à deformação do betume combinado em relação a um betume convencional (Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, 2016).

Em conformidade, a *Superpave* define uma "*performance*" (Grau PG), i.e., um intervalo de temperaturas para os betumes em que não se verificam degradações devido ao comportamento do ligante (deformações plásticas e rotura frágil) (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012).

O aumento do grau PG, para temperaturas positivas, e a diminuição, para temperaturas negativas, permite aferir a importância de adicionar RAR ao betume convencional, para melhorar o seu comportamento reológico

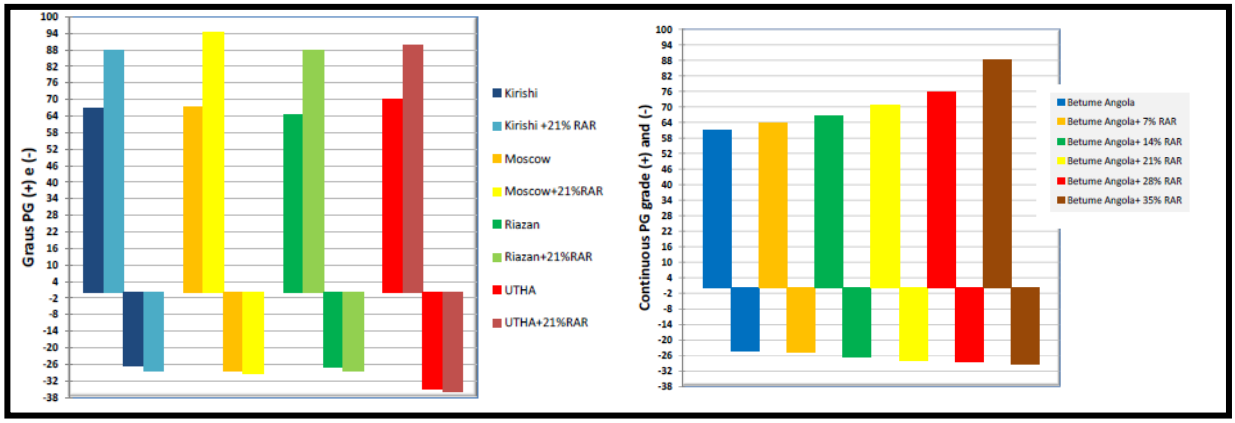


Figura 24 – Efeito da % de RAR no Grau PG de betumes combinados (Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, 2016)

O ligante betuminoso ganha com RAR um significativo aumento das suas propriedades elastómeras, sobretudo, elevada viscosidade a altas temperaturas e uma excelente flexibilidade a temperaturas baixas (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012).

Deve-se avaliar a capacidade de recuperação de um betume combinado às ações induzidas pelo tráfego, devido ao aumento da viscosidade. As propriedades do betume combinado recuperado podem ser estudadas utilizando os ensaios de resiliência do betume, assim como baseando-se no já descrito conceito de *Multi Stress Creep Recovery* (MSCR).

A presença de RAR num betume convencional promove um aumento da capacidade de recuperação do betume, devido ao aumento da percentagem de recuperação ou à diminuição dos valores de J_{nr}, consoante as proporções de RAR no betume combinado(Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, 2016).

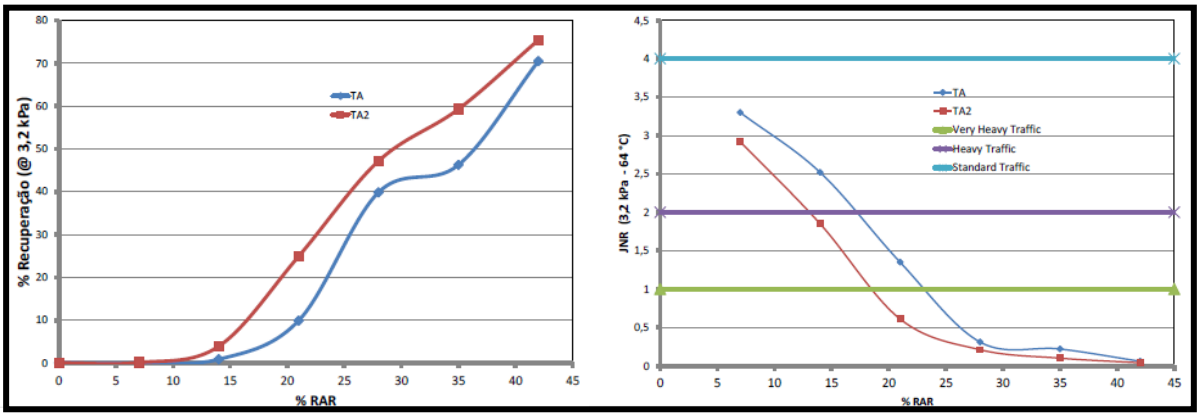


Figura 25 – Avaliação da capacidade de recuperação de um betume combinado (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012)

A *Federal Highway Administration* (FHWA, 2011) confirma que um ligante betuminoso com valores de $J_{nr} \leq 0{,}5\ kPa^{-1}$ tem melhor capacidade para contrariar problemas de deformação permanente devidos a tráfego extremamente exigente, com volumes superiores a 30 milhões de passagens de cargas de eixo-padrão (Domingos & Faxina, 2016).

Os ligantes betuminosos modificados com RAR apresentam valores de recuperação muito superiores aos convencionais devido à incorporação de borracha no ligante, proporcionando uma melhoria nas suas características de resiliência (Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, 2016).

A rede molecular formada pela interação das partículas de borracha com o *filer* e o ligante convencional faz com que o ligante betuminoso modificado com RAR transmita um comportamento elástico superior, reduzindo a acumulação de deformação permanente devidas ao tráfego (Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, 2016).

3.4.2. Desempenho das misturas betuminosas com a adição de RAR

Nas misturas betuminosas modificadas com borracha podem existir três tipos de granulometrias, as misturas do tipo “contínua” (*dense graded*), “aberta” (*open graded*) e “rugosa” (*gap graded*), sendo as duas últimas consideradas descontínuas (Bernucci, Motta, & Ceratti, 2008).

Em Portugal, as misturas betuminosas mais utilizadas referidas no CEEP são as do tipo “aberta” que possuem em geral 9 a 10 % de betume e as do tipo “rugosa” que detêm uma percentagem de betume entre os 7,5% a 8,5% (CEEP, 2014).

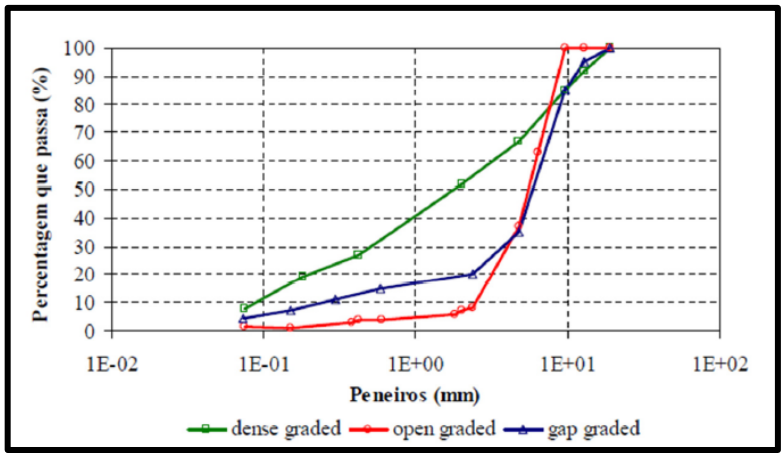


Figura 26 – Curvas granulométricas tipo utilizadas em misturas betuminosas (Fontes, 2009)

Os aspetos principais nas misturas betuminosas abertas (*open graded*) são o elevado teor de betume e a elevada fração de agregados grossos, sendo menor a fração de agregados finos (Figura 26). Por norma, estas misturas são utilizadas nas camadas de desgaste, a nível funcional, utilizando elevado volume de vazios disponível para lhe conferir boa permeabilidade que reduz o risco de hidroplanagem (Fontes, 2009).

As misturas betuminosas rugosas (*gap graded*) apresentam uma granulometria descontínua, com ausência de determinadas frações de agregados finos (Figura 26). Estas misturas podem ser utilizadas para camadas de desgaste, regularização e base, com funções estruturais ou funcionais, com redução do atrito pneu/pavimento e do ruído. Apresenta vantagens na melhoria da resistência às deformações permanentes, à fadiga e bom comportamento na propagação de fendas (Fontes, 2009).

Desenvolveu-se uma nova formulação de mistura betuminosa, designada de *ThinGap* (com RAR), com as qualidades de desempenho iguais ou superiores às misturas betuminosas *gap graded* para resistir à fissuração devido à fadiga, sem comprometer a resistência à deformação permanente, mas que pudesse ser utilizada como uma camada mais reduzida do mesmo modo que as misturas betuminosas tipo *open graded* (Sousa, Miranda, & Silva, 2012).

A mistura *ThinGap*, tem menor percentagem de agregados grossos e mais percentagem de agregados finos comparando com misturas *gap graded* e *open graded*, como ilustra a Figura 27 (Sousa, Miranda, & Silva, 2012).

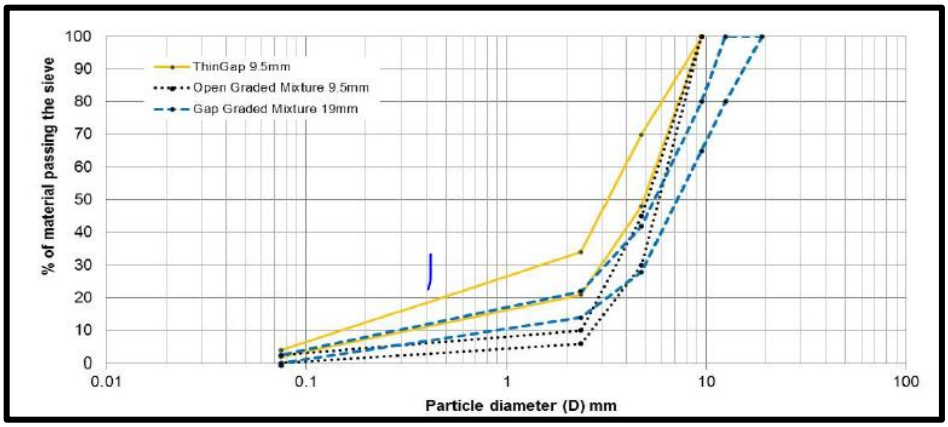


Figura 27 – Curvas granulométricas, *open graded*, *gap graded* e ThinGap (Sousa, Miranda, & Silva, 2012).

Desta forma, enquadra-se esta nova e melhorada mistura betuminosa na família das misturas betuminosas do tipo SMA (EN13018-5), contudo, neste caso, a elevada percentagem de filer, característica das SMA, é substituída pela utilização de RAR, que contribui, simultaneamente, para minimizar a quantidade de filer requerida e eliminar a necessidade de utilização de fibras celulósicas comummente utilizadas nessas misturas para mitigar o escorrimento de material betuminoso.

Como já referido anteriormente, para se formular uma mistura betuminosa adequadamente, é necessário proceder a ensaios que permitam o conhecimento da quantidade de ligante necessário para a mistura, para evitar a sua desagregação prematura, por falta de ligante, ou a formação de superfícies escorregadias e deformáveis, pelo seu excesso.

O estudo de Marshall para a nova e melhorada mistura *ThinGap*, permite valores de estabilidade média de 9 kN, um valor habitual de deformação segundo (Sousa, Miranda, & Silva, 2012), significando assim que, a utilização de RAR aumenta a resistência da mistura betuminosa, sem com isso aumentar a sua rigidez, ou seja, a borracha faz com que a mistura betuminosa tenha melhores comportamentos de resistência à deformação permanente e à fadiga, devido ao aumento significativo da elasticidade do betume às temperaturas de serviço.

A mistura betuminosa com RAR deforma-se devido a solicitações do tráfego, aproximadamente o mesmo que uma mistura convencional só que a RAR permite que a mistura tenha maior capacidade de recuperar essa deformação, apresentando assim, um comportamento mais elástico, como ilustra a Figura 25.

Através de estudos efetuados a diferentes tipos de misturas betuminosas, do tipo *open graded*, *gap graded* e *ThinGap*, é evidenciado a excelente resistência à deformação permanente e à fadiga que a RAR apresenta às misturas, comprovando também o que já tinha sido anteriormente referido na avaliação reológica do ligante betuminoso com RAR (Sousa, Miranda, & Silva, 2012) (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012).

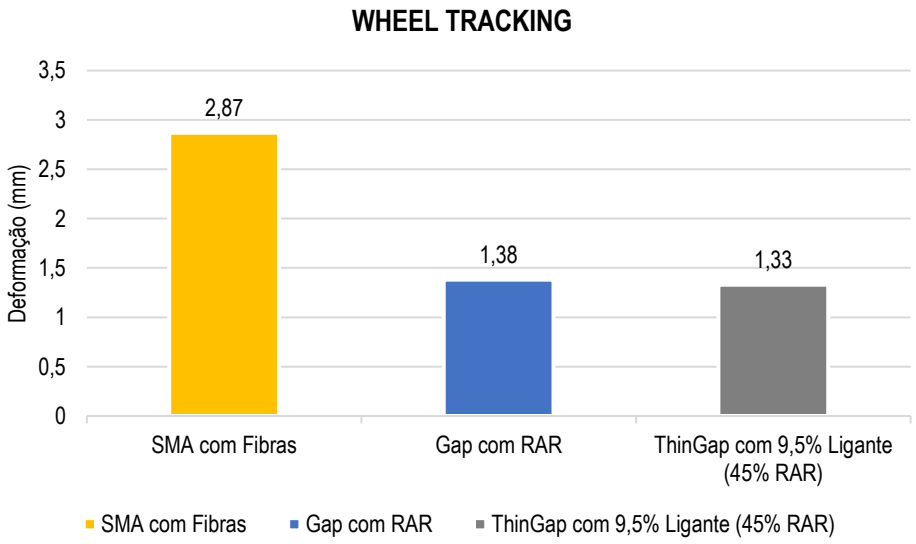


Figura 28 - Resistência à deformação permanente de diferentes misturas (Sousa, Miranda, & Silva, 2012)

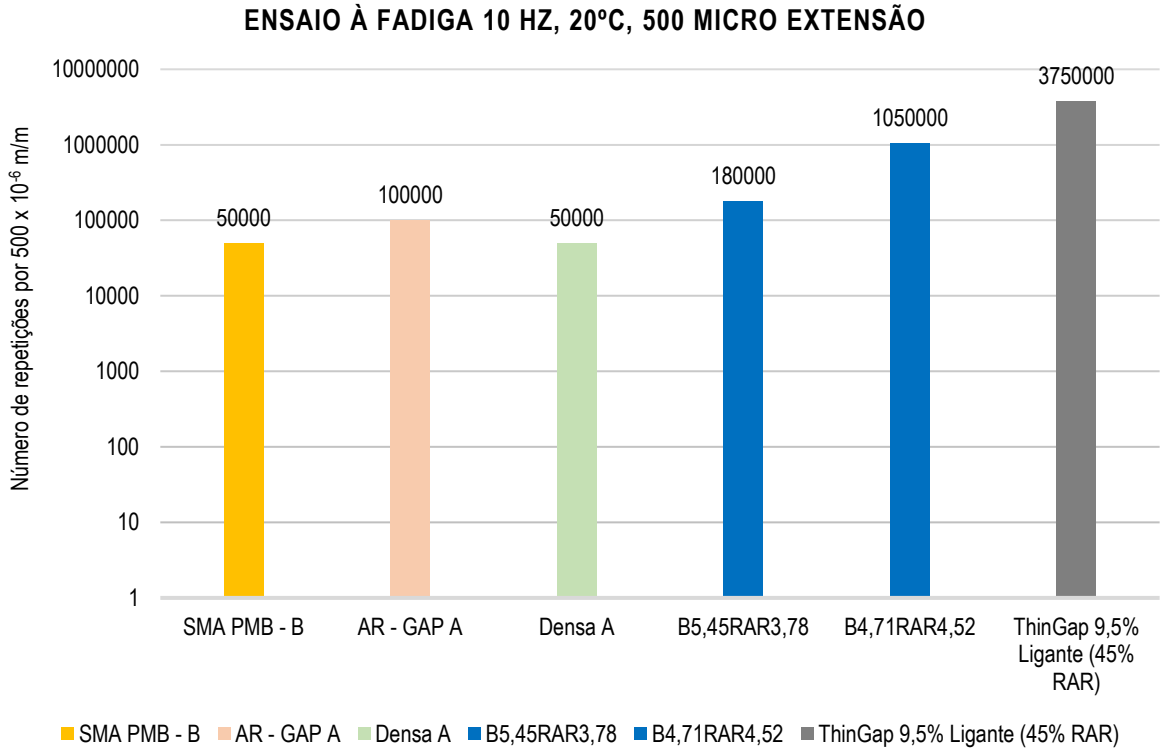


Figura 29 - Ensaio de avaliação de resistência à fadiga (Consulpav, 2016)

A adição de RAR a uma mistura betuminosa faz com que o ligante fique mais viscoso à temperatura de compactação (cerca de 150 a 170 ºC), o que permite que se usem maiores quantidades sem correr o perigo de escorrimento. Essa adição, também torna o ligante mais elástico às temperaturas de serviço do pavimento, como se pode constatar na redução do J_{nr} e no aumento da resiliência. Este aumento de elasticidade, melhora as prestações à fadiga e à deformação permanente (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012). Ou seja, embora o módulo de deformabilidade da mistura betuminosa com RAR diminua ligeiramente em comparação ao de uma mistura convencional a 20 ºC, o aumento da flexibilidade que advém da percentagem de RAR, promove um aumento da resistência ao fendilhamento (por reflexão de fendas). A resistência à deformação permanente não é comprometida, pois esta tende a ser assegurada pela mistura de agregados grossos e também porque a altas temperaturas (60ºC), quando pode ocorrer deformação permanente, o módulo de deformabilidade da mistura com RAR aumenta em relação às misturas convencionais. Também a estas temperaturas o ligante é mais elástico, pelo que a recuperação após cada aplicação de carga é maior, reduzindo assim a deformação permanente.

A adição de RAR em misturas betuminosas também não afeta a resistência da mistura à ação da água, por o acrescento de RAR à mistura reduzir a percentagem de vazios disponíveis para incorporar as partículas de água (Kedarisetty, Biligiri, & Sousa, 2016).

O desempenho de pavimentos com misturas betuminosas com borracha, quando introduzidas na reabilitação de pavimentos rodoviários, tem permitido a redução em aproximadamente 50 % da espessura das camadas betuminosas (Pais J. , Pereira, Gardete, & Minhoto, 2008).

Segundo Guia redigido pela *California Department of Transportation* (Caltrans) e aprovada pela *Federal Highway Administration* (FHWA), é possível reduzir significativamente a espessura da camada betuminosa, caso esta seja desenvolvida a partir de uma mistura betuminosa com borracha (Caltrans, 2003) o que também sucede com RAR (Sousa, Miranda, & Silva, 2012).

Propriedades Estruturais		Retardar a Reflexão de Fendas	
Mistura Betuminosa Densa (cm)	Mistura Betuminosa com Borracha (cm)	Mistura Betuminosa Densa (cm)	Mistura Betuminosa com Borracha (cm)
4,6	3,1(1)	4,6	3,1(1)
6,1	3,1		
7,6	4,6	6,1	3,1
9,2	4,6		
10,7	6,1	7,6	4,6
12,2	6,1		
13,7	4,6(2)	9,2	4,6
15,3	4,6(3)		
16,8	6,1(2)	10,7	4,6 ou 6,1(4)
18,3	6,1(3)		

Tabela 13 - Espessura camada betuminosa (Caltrans, 1992)

(1) – Mínima espessura permitida para uma Mistura Betuminosa com Borracha é 3,1 cm;
(2) – Colocar primeiro uma Mistura Betuminosa Densa com 4,6 cm;
(3) – Colocar primeiro uma Mistura Betuminosa Densa com 6,1 cm;
(4) – Usar uma espessura de 4,6 cm, se a largura da fissura for < 0,3 cm ou usar uma espessura 0,20 cm se a largura da fenda for >0,3 cm.

3.4.3. Aspetos relacionados com a produção das misturas com RAR

Dada a melhoria exponencial que a RAR oferece a uma mistura betuminosa é expectável que, a maior ou menor prazo, as centrais de reciclagem de pneus usados passem a conter unidades de fabrico desse produto integradas na linha produção e que o mesmo seja transportado diretamente para as centrais de fabrico de misturas betuminosas sob a forma de granulado seco.

Como já referido, a RAR é normalmente constituída por 62% de granulado fino de borracha de pneu reciclado, 22% de betume convencional e 16% de filer comercial.

Chegado às centrais betuminosas, uma das maiores diferenças que um betume combinado com RAR apresenta ao betume modificado com borracha, é o de a RAR poder ser adicionada diretamente no misturador de qualquer central de fabrico de mistura betuminosa evitando as algo complexas “digestões” que se tinham anteriormente de promover na via húmida.

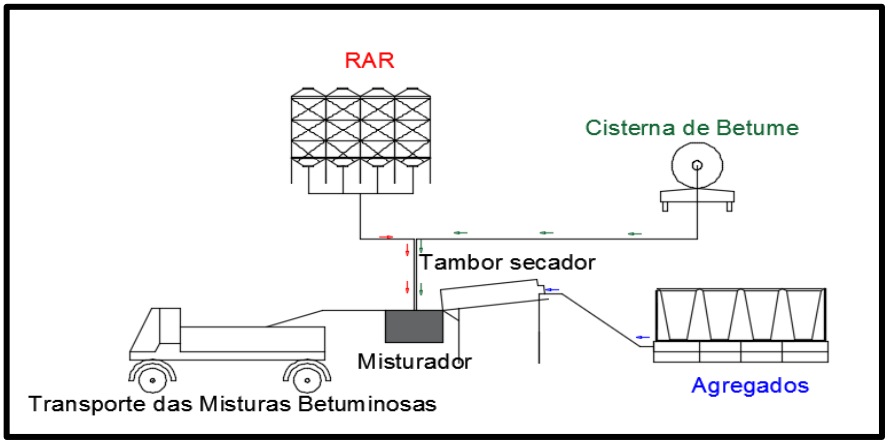


Figura 30 - Etapas do processo de fabrico de uma Mistura Betuminosa com RAR

Os primeiros constituintes a serem adicionados devem ser os agregados e filer, seguindo-se a junção da RAR, e, só após esses agregados estarem adequadamente envolvidos, é que é adicionado o ligante betuminoso.

Bastam apenas 30 s para a RAR envolver-se adequadamente com os restantes componentes, absorvendo-se no betume (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012).

As temperaturas a que as misturas betuminosas com RAR devem ser misturadas rondam os 170 a 180 ºC, temperatura idênticas às da produção de misturas betuminosas com aditivos (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012). Para misturas com percentagens de RAR superiores a 3,5% os agregados devem ser aquecidos a temperaturas superiores para permitir que a mistura ascenda rapidamente à temperatura adequada.

Uma correta análise em laboratório de uma mistura betuminosa com RAR, após a união de todos os componentes, requer que a mesma fique em repouso numa estufa durante 1 h a 170 ºC, de maneira a simular o tempo necessário à sua aplicação em obra sendo, nesse período, que a RAR ativa o betume e a superfície dos agregados.

As propriedades do betume combinado têm um aumento significativo quando este contém mais 15% de RAR (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012) tendo, contudo, nesse caso, de se dar particular atenção ao controlo quer do aumento da viscosidade quer da quantidade de betume convencional presente, pois tem de se garantir existir em quantidade suficiente para envolver adequadamente os agregados da mistura.

A maioria dos estudos aponta para as misturas betuminosas devam conter cerca de 4% de betume convencional (com relação à massa total da mistura) para terem apropriada trabalhabilidade e permitirem um adequado envolvimento com os agregados.

Daí que um betume combinado com RAR se diferencie de um betume modificado com borracha, pois para a obtenção da quantidade ótima de betume pode-se utilizar RAR em sua substituição (p.e., se para uma mistura SMA se prevê a utilização de 6% de betume, então, se para o mesmo caso se equacionar, em alternativa, adição de RAR então, na nova mistura, será de prever a utilização de 4% de betume convencional e 2% de RAR (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012).

3.4.4. Vantagens e limitações das Misturas Betuminosas com adição de RAR

Das numerosas vantagens para as misturas betuminosas da adição de RAR, salientam-se:

i. As misturas passam a dispensar outros aditivos (polímeros, fibras, etc.) por a RAR, de per si e em adequada proporção, induzir nas misturas betuminosas suficientes melhorias a nível de adesividade, resistência à fadiga e deformação permanente.
ii. Maior flexibilidade às misturas betuminosas aumentando a elasticidade dos pavimentos.
iii. Diminuição da suscetibilidade do pavimento às temperaturas.
iv. Maior resistência à oxidação dos constituintes do betume devido ao maior teor de ligante atrasando o envelhecimento.
v. Maior resistência às agressões de agentes atmosféricos como raios ultravioleta e infravermelhos.
vi. Maior resistência à propagação de fendas e otimização da permeabilidade do pavimento.
vii. Redução dos custos por as camadas poderem ser fabricadas com espessuras mais reduzidas e exigirem menor manutenção, devido ao aumento da durabilidade e ao melhor desempenho do pavimento.
viii. Maior segurança rodoviária, devido quer ao maior atrito no contacto do pneu com o pavimento (Sousa & Silva, 2012) quer a maior segurança visual, pois a RAR age como

um pigmento que mantém o pavimento mais negro proporcionando maior contraste com a sinalização horizontal do pavimento.

ix. Vantagens ambientais diversas decorrentes de redução do ruído até 5 dB (Sousa, Miranda, & Silva, 2012), consumo de menor quantidade de matérias primas e da reutilização de material reciclado permitindo solução para o problema de armazenamento e combustão dos pneus em aterros sanitários, proibido pelo Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de abril e para os impactos paisagísticos negativos da existência de todo o tipo de depósitos de pneus usados.

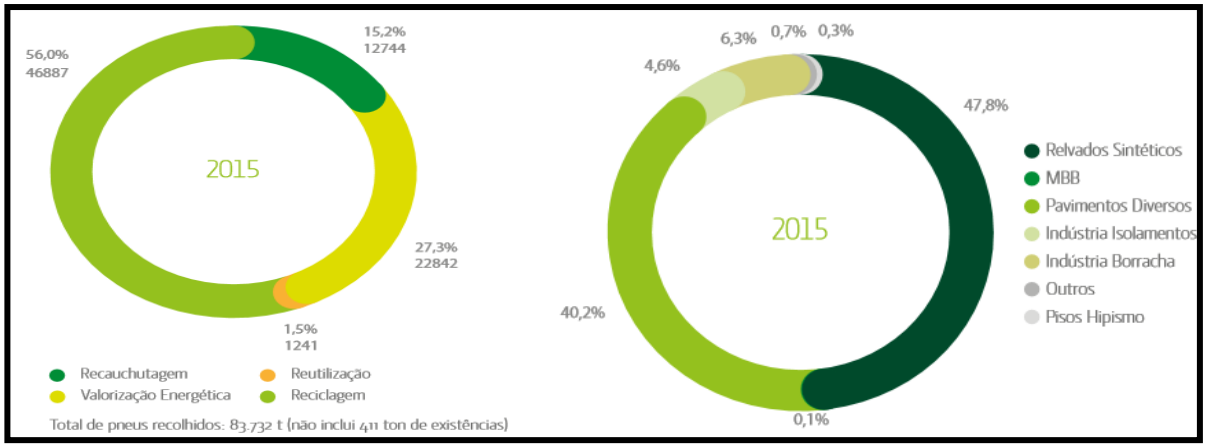


Figura 31 - Destino dos pneus recolhidos em 2015 e principais aplicações (Valorpneu, 2015)

Nas desvantagens da RAR identifica-se:

i. O custo inicial de produção das misturas ser superior, por tonelada, ao das misturas convencionais. Contudo, as qualidades que a RAR confere às misturas betuminosas são compensadas, desde logo, só com a redução das quantidades necessárias a que acresce a maior vida útil e todas as demais vantagens já referidas.

ii. A produção de misturas betuminosas com RAR exigir maior controlo de temperaturas e a compactação deve ser executada a temperaturas mais elevadas do que as que se praticam com misturas betuminosas convencionais (Caltrans, 2003), pois tal como nos polímeros, a borracha endurece os ligantes a altas temperaturas.

iii. O granulado de borracha para matéria prima da RAR, obtida através do processo de reciclagem criogénica ou mecânica de pneus usados de veículos ligeiros ou pesados, dever apresentar-se com granulometria inferior a 1,0 mm para o fabrico da RAR, exigindo a separação dos arames de aço e fibras antes da trituração (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012).

3.5. COMPARAÇÃO ENTRE BMB E LIGANTES BETUMINOSOS COM RAR

De acordo com a ASTM D8 – 2002 (ASTM, 2002), um betume modificado com borracha (BMB) é uma mistura de betume, borracha de pneus usados e aditivos na qual a borracha representa pelo menos 15% do peso total da mistura que reagiu com o betume convencional a temperatura suficientemente elevada para provocar a reação das partículas de borracha.

Existem dois métodos para incorporar a borracha de pneus usados em misturas betuminosas, o processo húmido (*wet process*) e o processo seco (*dry process*).

O armazenamento do betume modificado com borracha (BMB) é permitido para períodos não superiores a 10 h, a uma temperatura superior a 160 ºC e nunca excedendo os 180 ºC, em permanente agitação, de forma a garantir a homogeneidade.

Em Portugal, têm sido produzidas dois tipos de misturas betuminosas com BMB, ambas descontínuas, sendo uma delas rugosa e a outra aberta (LNEC, 2007).

Apesar das comprovadas vantagens face a betumes convencionais, a aplicação de misturas betuminosas com betume modificado com borracha não se tem imposto como se chegou a perspetivar sendo algumas das razões desse facto as seguintes:

i. A produção convencional de BMB pela via húmida exige temperaturas muito elevadas (à volta de 190 ºC) e tempo de reação muito elevado (45 min até 1 h) (Antunes, Eusébio, Costa, Domingos, & Lima, 2002);
ii. Sofisticação e o elevado custo da unidade de produção do BMB, que inevitavelmente deve ser instalada em todas as centrais de fabrico de misturas betuminosas, sem recentes avanços ou inovações que tenham tornado a sua aplicação mais fácil;
iii. Necessidade de reaquecer o BMB após longos períodos de armazenamento (Recipav, 2007);
iv. Elevado custo de produção deste tipo de misturas betuminosas, comparativamente às misturas convencionais.

Segundo estudos de investigação e desenvolvimento efetuados, é apresentado que as misturas betuminosas com adição de RAR apresentam um desempenho muito superior relativamente às misturas betuminosas convencionais, assim como às misturas betuminosas com betumes modificados com borracha (BMB).

Comparativamente aos BMB, as principais vantagens da RAR para modificar o ligante betuminoso nas misturas (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012) são:

i. A RAR poder ser adicionada em qualquer central de fabrico de misturas betuminosas diretamente no misturador ou no tambor secador;
ii. Facilidade e rapidez de produção dispensando a necessidade de um reservatório de mistura como ocorre no caso da produção com BMB ou de modificação com polímeros;
iii. Dispensa de ciclos de reaquecimento na central de fabrico de misturas ou no local de aplicação;
iv. A RAR ser um granulado seco de fácil manuseamento, armazenamento e transporte;
v. A RAR, em adequada percentagem, poder ser adicionada a qualquer tipo de mistura betuminosa (rugosa, densa, aberta, ou do tipo SMA);
vi. O aumento da percentagem de RAR no betume combinado, melhorar significativamente o grau PG da mistura (para ambos os indicadores, positivo ou negativo);
vii. A RAR viabilizar a produção de misturas com maiores percentagens finais de borracha, consequentemente, com maior resistência, resiliência e recuperação;
viii. Diminuir a energia requerida à produção durante o fabrico do ligante betuminoso modificado;
ix. Oferecer boa relação custo/beneficio comparativamente às misturas com BMB.

3.6. ANÁLISE COMPARATIVA DOS CUSTOS DE CICLO DE VIDA

Para decidir qual a mistura betuminosa mais indicada a um determinado pavimento e quando, deve-se ter em consideração a relação custo/benefício ponderada dos custos de aplicação da mistura e do desempenho que expectavelmente conferirá ao pavimento ao longo da sua vida útil estendido à comparação da mistura com e sem RAR.

Com efeito, apesar de uma mistura betuminosa com RAR ser, por unidade de peso, naturalmente mais dispendiosa que as misturas betuminosas convencionais, as melhorias de desempenho que os pavimentos betuminosos com a adição de RAR, conferem a esta última solução por regra uma relação custo/beneficio inferior, i.e., vantajosa.

Essa vantagem decorre, sobretudo, da redução da quantidade de mistura necessária (menor espessura das camadas), da menor atividade de manutenção/conservação subsequente e da maior vida útil e, também, do melhor desempenho do pavimento no plano da segurança e ambiental, sendo estes últimos fatores não menos importantes, mas de valorização mais subjetiva.

Dois casos práticos, um em Lisboa e outro em Madrid (Fontes L. , 2009) evidenciaram a possibilidade de se reduzir até 50% a espessura da camada betuminosa reforçada. Desta forma, embora o preço unitário de misturas convencionais seja menor, a redução da espessura da camada de reforço garante uma competitividade económica (Tabela 14). Estes valores foram calculados com base em dados obtidos no Arizona Department of Transportation (ADOT) devendo-se ter em conta que a elaboração da Tabela 14 considerou que todas as misturas têm a mesma esperança de vida quando colocadas sobre um pavimento existente que atingiu ruína por fadiga.

Dadas as grandes vantagens que as misturas modificadas com borracha e com RAR proporcionam aos utentes com custos por m^2 inferiores, de 40 a 60% relativamente às misturas convencionais, dificilmente se percebe que a aplicação destas misturas ainda não tenha disparado, sobretudo na contratação pública.

Mistura Betuminosa		(%)	€/ton	€	Espessura da camada (cm)	Custo (€/m²)	Redução de custos em relação à Mistura Convencional
Convencional	Mistura	100	32,2	32,2	12	15,48	0%
	Ligante	5	371,7	18,6			
TOTAL (€/ton)				**50,8**			
BMB	Mistura	100	33,9	33,9	5	10,66	31%
	BMB	9	590	53,1			
TOTAL (€/ton)				**87,0**			
Convencional c/RARX	Mistura	100	32,2	32,2	5	9,25	40%
	Ligante	6,475	371,7	24,1			
	RARX	2,775	594,0	16,5			
TOTAL (€/ton)				**72,8**			
ThinGap c/RARX	Mistura	100	32,2	32,2	3	5,85	62%
	Ligante	6,5	371,7	24,2			
	RARX	4,2	594,0	24,9			
TOTAL (€/ton)				**81,3**			

- **Preços ADOT: i) mistura betuminosa convencional a 38 USD/ton; ii) betume a 438 USD/ton; iii) mistura BMB a 40 USD/ton; iv) betume modificado com borracha a 590 USD/ton; e v) RAR a 700 USD/ton.**
- **Em outubro de 2017, 1 USD tinha o valor cambial aproximado de 0,85 €.**
- **Peso específico das diferentes misturas betuminosas: i) Convencional: $\gamma \approx 2{,}54$ ton/m³; ii) Com BMB: $\gamma \approx 2{,}45$ ton/m³; iii) ThinGap: $\gamma \approx 2{,}4$ ton/m³.**

Tabela 14 – Custos de produção de misturas betuminosas em €, e custos de aplicação em m²

CAPÍTULO 4

REPARAÇÃO DE UM TRECHO PILOTO

4.1. DESCRIÇÃO DO TRECHO PILOTO PARA UMA REPARAÇÃO COM RAR

Todas as estradas ao fim de um certo período apresentam degradações e as da Região Autónoma da Madeira (RAM), naturalmente, não são exceção.

Porque nunca houve qualquer experiência regional de utilização de misturas betuminosas com BMB ou com RAR, decidiu-se nesta dissertação, com a colaboração do Governo Regional, estudar a aplicação de RAR a um trecho piloto. Caso os resultados do estudo sejam implementados, acredita-se que as técnicas de reparação e construção de pavimentos betuminosos poderão ser revolucionadas com elevados benefícios económicos, de segurança e ambientais para a RAM.

Daí que tenhamos escolhido para trecho piloto um troço de estrada com significativo tráfego, já com vida útil ultrapassada e com diferentes patologias para o qual se procedeu a um estudo de reabilitação estrutural.

O objetivo, portanto, não é, tão só estudar e propor uma moderna solução para as degradações presentes nesse troço, mas, também alargar os horizontes à indústria e à Administração Regional avaliando os previsíveis resultados caso se opte por um reforço com uma mistura betuminosa *ThinGap* com RAR.

O trecho piloto situa-se na cidade do Funchal, pertence à ER 115 (Anexo AVI.1) e faz a ligação entre a rotunda D. Francisco Santana e o início da concessão da VIALITORAL. Este trecho, com cerca de 250 m, constitui uma ligação de grande importância na malha viária regional, pois assegura a ligação principal de e para o Hospital Dr. Nélio Mendonça, através da principal via rodoviária da Madeira – a VR1.

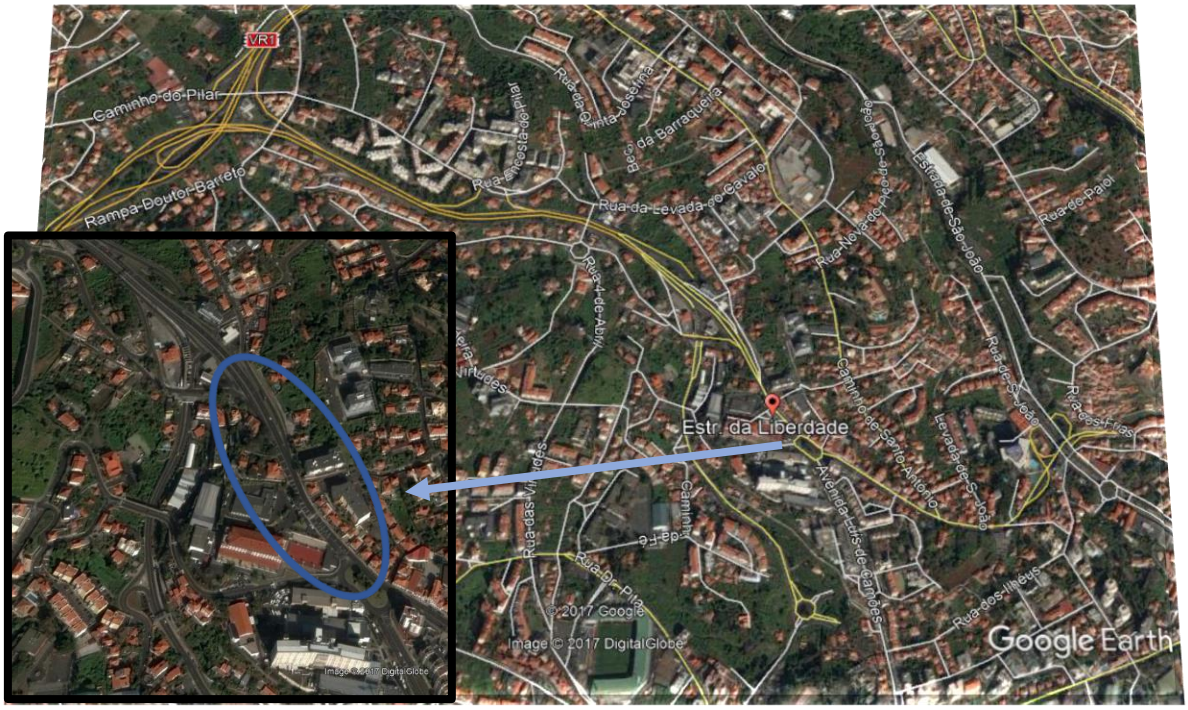


Figura 32 - Localização do trecho em estudo na rede viária envolvente

A proximidade do troço ao hospital, a sua contiguidade com uma ligação direta à VR1 e o facto de ser ladeado por uma grande escola e por muitas habitações aconselham também a que o pavimento deste trecho seja o mais seguro e confortável possível, incluindo que seja o menos ruidoso possível.

Nos últimos anos, este trecho, não sofreu intervenções de conservação com a periodicidade devida, o que é visível nas patologias existentes, que atingiram um elevado grau de deterioração. Nessas patologias identificámos uma diversidade de degradações, adiante descritas e de tal modo desenvolvidas, que uma adequada reparação não consistirá em mera conservação corrente.

Desta forma, a reabilitação proposta justifica-se por o pavimento rodoviário apresentar falta de capacidade de carga e, se pretendido manter com um padrão de qualidade aceitável (p.e., o exigido no troço concessionado contíguo), requerer uma grande reparação.

4.1.1. Caracterização do estado do pavimento existente

Para se registarem as anomalias foi realizada uma pormenorizada inspeção visual percorrendo demoradamente a pé o trecho fotografando-se tudo o que nos pareceu relevante quer para memória quer para permitir depois, em gabinete, rever mais pormenorizadamente as patologias. Elaborou-se, assim, um registo do estado do pavimento, com as patologias presentes assinaladas e a sua possível origem.

A inspeção visual denunciou suficientes indicadores de problemas justificando uma detalhada caracterização estrutural do pavimento, o que foi prosseguido mediante ensaios de carga com defletómetro de impacto.

Dada a curta extensão do trecho, não foi necessário subdividi-lo em zonas mais homogéneas. Procedeu-se também à extração de carotes do pavimento degradado, para confirmação da natureza dos materiais e espessuras das camadas face ao projeto de construção que nos foi disponibilizado.

4.1.1.1. Observação visual com apoio fotográfico

A caracterização do pavimento existente foi realizada com bom tempo, sem chuva, não permitindo detetar eventuais disfuncionalidades da drenagem que se tornem mais evidentes nos períodos de precipitação. O facto do trecho consistir, em perfil, grosso modo, numa concordância vertical convexa e num trainel com uma inclinação de 2,5% não faz, contudo, adivinhar dificuldades de escoamento longitudinal nem temos relato disso.

A inspeção visual pedonal pretendeu verificar as seguintes degradações:

i. Fendilhamento;

ii. Deformações;

iii. Desagregações superficiais;

iv. Movimento de materiais.

Avaliadas as características superficiais do trecho admitiu-se que o mesmo poderia apresentar degradações mais profundas, perto da ruína, considerando as patologias evidentes e a reduzidíssima conservação de que foi alvo desde que entrou em serviço.

De seguida, apresentam-se, resumidamente, as degradações observadas ao longo de todo o trecho da ER 115. Esta análise ao estado de degradação foi classificada segundo (Teng, 2003). O nível A corresponde a um grau de severidade alto, o nível M ajusta-se a um grau de degradação médio e o nível B associa-se ao menor grau de degradação.

Foram identificadas as seguintes deteriorações (Anexo: AV.5):

i. Fendilhamento:

Esta degradação está presente praticamente em todo o trecho através de fissuras longitudinais e transversais, resultado do desgaste da fadiga dos materiais das camadas betuminosas sujeitos a frequentes esforços de tração por flexão. Outras causas poderão, contudo, estar na origem de fissuração.

As fendas originadas por fadiga estavam presentes no eixo e, por vezes, nas zonas dos rodados. A maioria dessas fendas são isoladas, contudo, em determinadas zonas, apresentam ramificações.

Muitas fendas, transversais e longitudinais evoluíram e originaram, em diversas zonas, grandes áreas de pele de crocodilo, apresentando-se maioritariamente com um grau de severidade alto.

Observou-se, também, em algumas zonas, a existência de ninhos de baixa degradação.

ii. Deformações:

Foram observadas deformações, por falta de capacidade de carga das camadas e/ou do solo de fundação. As deformações presentes estão associadas com outra patologia, designadamente com a pele de crocodilo.

Verificaram-se abatimentos com um grau de severidade bastante alto, por infiltração de água no interior da estrutura do pavimento aos km 0+135 e no km 0+075.

A presença de rodeiras no trecho em estudo é, contudo, de muito expressão, em comparação a outros tipos de degradações existentes.

iii. Desagregações:

No trecho em estudo pôde-se observar a existência de desagregação dos materiais constituintes da superfície da camada de desgaste, com maior evidência em zonas de abrandamento do troço, mais precisamente entre o km 0+050 e o km 0+100, no sentido descendente.

As desagregações existentes no trecho são consequências das degradações já anteriormente referenciadas traduzindo-se em fragmentações da camada de desgaste. Com o passar do tempo, a mistura betuminosa tem vindo a perder características comprometendo a estabilidade de ligação entre os agregados.

iv. Movimento de materiais:

Só muito pontualmente foram observados indícios de movimento de materiais, nas zonas de pele de crocodilo, com subida de finos numa atuação simultânea da circulação de veículos com deficiente drenagem potenciada pelo envelhecimento do ligante.

4.1.1.2. Ensaios de carga com o Defletómetro de Impacto

Para completar a caracterização estrutural do pavimento em estudo executaram-se ensaios de carga com o auxilio de um Defletómetro de Impacto (FWD – *Falling Weight Deflectometer*). Foram avaliados 11 pontos no sentido descendente e 12 pontos no sentido ascendente, espaçados de 25 m.

Foi aplicada uma força de 65 kN, nos pontos de avaliação, ao longo das rodeiras externas, por serem os pontos mais desfavoráveis. A Figura 33 permite localizar os ensaios realizados

ao longo de uma extensão de 247 m no sentido descendente e de 275 m no sentido ascendente, e ainda, a distância entre pontos de avaliação.

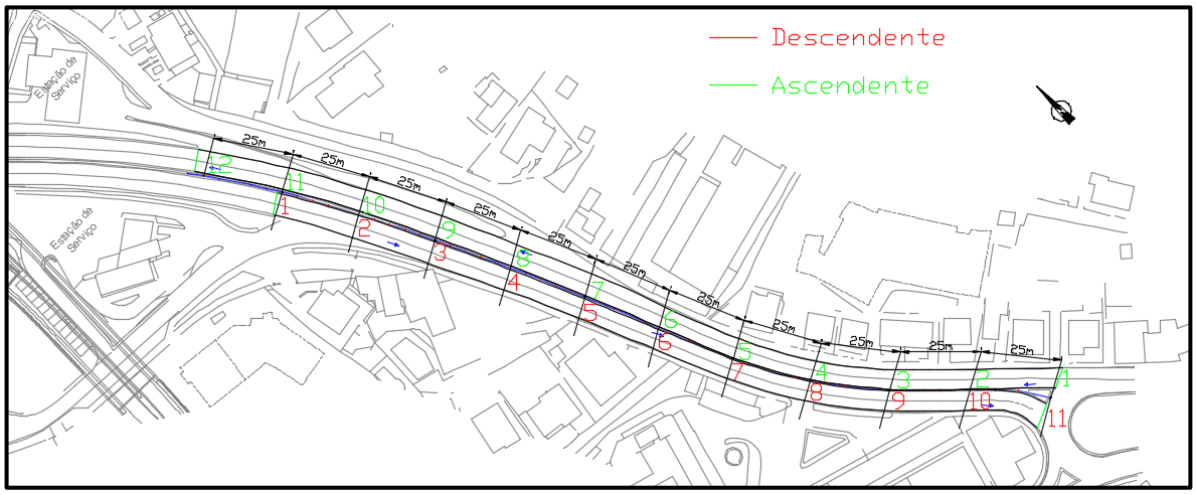


Figura 33 - Localização dos pontos de ensaio realizados com o Defletómetro de Impacto

Os resultados obtidos com os ensaios de carga são indicados na Tabela 15, indicando as deflexões características obtidas através do ensaio com o Defletómetro de Impacto, segundo o Anexo: AV.2.

Estação		Df_1	Df_2	Df_3	Df_4	Df_5	Df_6	Df_7	Df_8	Df_9
Ascendente	0,025	645	499	418	340	210	145	100	72	54
	0,250	824	594	459	352	211	121	74	53	41
Descendente	0,025	780	508	377	270	109	55	43	34	32
	0,175	699	156	127	114	97	81	67	49	40

Tabela 15 – Análise das deflexões caracteristicas segundo (Anexo AV.2)

4.1.1.3. Plano de Prospeção

Foi também definido um plano de prospeção para o trecho em estudo, para a caracterização da constituição do pavimento (espessura e natureza das várias camadas constituintes).

De modo a ter em conta a natureza dos materiais e espessura das camadas, foram efetuados quatro ensaios à rotação (Anexo: AV.5). A localização de cada ensaio foi escolhida para coincidirem com as zonas de acentuado nível de deflexão, obtidas a partir dos resultados do Defletómetro de Impacto (Anexo: AV.2,). A Tabela 16 apresenta os locais onde se efetuaram sondagens à rotação.

Carotes	Sentido	Lado	pK
SR_1	Ascendente	Direita	0+025
SR_2	Ascendente	Direita	0+250
SR_3	Descendente	Direita	0+025
SR_4	Descendente	Direita	0+175

Tabela 16 - Locais onde se efetuaram sondagens à rotação

As carotes retiradas, para além de definirem a espessura e a natureza dos materiais presentes, permitem avaliar a profundidade e a gravidade das fendas e desta forma projetar os trabalhos de reabilitação do pavimento.

O cotejo dos resultados dos ensaios à rotação com o projeto de construção ("Via Rápida de Saída Oeste do Funchal") do ano 2000, torna evidente que o pavimento existente difere enormemente do projetado, sinal que, na construção inicial ou mais tarde se optou por aumentar a espessura total de camadas betuminosas de 13 para cerca de 25 cm (Vide Figura 34).

O Relatório de ensaio (Anexo: AV.3) contém as espessuras identificadas a partir das carotes retiradas nas sondagens realizadas que se resumem na Tabela 17.

Carotes	Sentido	pK	BB (cm)	MB (cm)	Total (cm)
SR_1	Ascendente	0+025	5,5	20	25,5
SR_2	Ascendente	0+250	5,5	20	25,5
SR_3	Descendente	0+025	4,5	20	24,5
SR_4	Descendente	0+175	3,5	20	23,5

BB – Betão Betuminoso;
MB – Macadame Betuminoso.

Tabela 17 – Espessura e natureza das camadas identificadas nas carotes recolhidas no trecho piloto

Com efeito, analisando a Tabela 17, constata-se que o pavimento existente tem camadas betuminosas com espessura total entre os 23,5 e 25,5 cm com espessuras de betão betuminoso na camada de desgaste variáveis, menos espessas no sentido descendente.

No sentido ascendente, a camada de desgaste é mais espessa, contudo, através da observação do pavimento e da análise dos carotes, concluiu-se que as respetivas misturas betuminosas se apresentam degradadas com um grau de severidade acentuado.

4.1.1.4. Determinação dos Módulos de Deformabilidade

Dada a reduzida extensão do trecho piloto não faz sentido a sua subdivisão por comportamento estrutural tendo o mesmo sido considerado homogéneo em cada sentido de circulação designadas de descendente e ascendente.

Para mensurar a baixa qualidade estrutural atual do pavimento foi determinado, para cada estrato do pavimento existente, o respetivo módulo de deformabilidade calculado iterativamente por retroanálise (vide capítulo 2) e com auxílio do programa de cálculo ModComp. A geometria do pavimento e as deflexões obtidas pelo FWD são parâmetros necessários nesta fase de aproximação da deformada obtida "*in situ"* com a deformada calculada. A Figura 34 ilustra a geometria estimada para o pavimento em estudo, com base na prospeção efetuada.

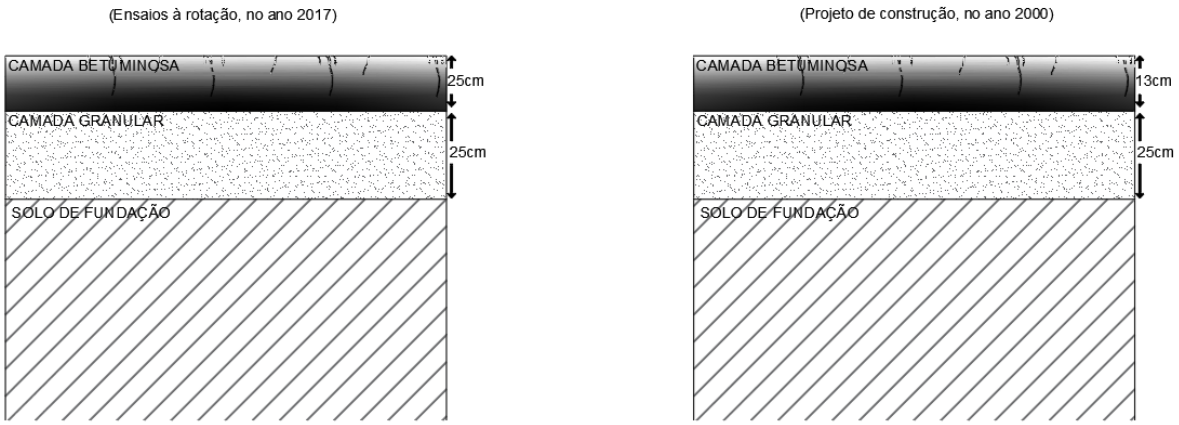


Figura 34 - Geometria do pavimento existente e do projeto

O ModComp envolve, também, a seleção de módulos de deformabilidade para cada camada constituinte do pavimento. Com esses módulos calculam-se deflexões à superfície (deflexões calculadas) que se comparam com as deflexões medidas com o FWD. Os valores dos módulos assumidos são ajustados e o processo repetido até que as deflexões calculadas correspondam às deflexões medidas dentro de uma tolerância especificada (*Root Mean Square* (RMS) ≤ 15%).

Na zona ascendente foi possível obter uma boa aproximação entre os pontos definidores da deformada com um RMS de 4,64% para o SR1 e de 6,58% para o SR2. Já na zona descendente obtiveram-se RMS de 45,38% para SR3 e de 13,65% para SR4. Os resultados da iteração dos módulos de deformabilidade são apresentados no Anexo AV.4.

A Tabela 18 contém os módulos de deformabilidade nas 4 zonas "caroteadas" para o estudo.

Zona	Módulo de Deformabilidade (MPa)				RMS (%)
	Camada Desgaste	Camada de Regularização	Camada Granular	Solo de Fundação	
SR1	1000	2180	100	63,6	4,64
SR2	1000	1000	100	50,5	6,58
SR3	700		300	55	45,38
SR4	1000	739	100	91,1	13,65

Tabela 18 – Módulos de deformabilidade do pavimento em estudo

Conjugando o critério de que uma boa aproximação dos módulos de deformabilidade exige um RMS inferior a 15% que o elevado desvio associado a SR3 (45,38%) não cumpre, a zona descendente foi analisada a partir das características da carote SR4.

Conforme se infere das Tabela 18 e Tabela 15 o pavimento encontra-se num estado de capacidade estrutural reduzida pois as zonas analisadas apresentam deflexões elevadas, uma ampla área de degradações superficiais e módulos de deformabilidade nas camadas betuminosas muito reduzidos.

Como referido no capítulo 3, por os módulos de deformabilidade obtidos por retroanálise não estarem relacionados com o efeito da temperatura de projeto, foi necessário corrigi-los para a temperatura de projeto, através da expressão (45).

$$E_{T.Projeto}= \left(\frac{E_{Retro\text{-}análise}}{1\text{-}1{,}384 \times \log\left(\frac{T_{BELLS3}}{15ºC}\right)} \right) \times \left(1\text{-}1{,}384 \times \log\left(\frac{T_{Projeto}}{15ºC}\right) \right) \quad (45)$$

Para determinar a temperatura de projeto de cada camada betuminosa, utilizou-se a metodologia adotada pelo Manual de Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis das Estradas de Portugal.

Distrito	Localidade	Lat. N	Long. W	Altitude	T_{ar}	$T_{projeto}$ (p/espessuras) (m)			
						0,05-0,09	0,1-0,19	0,2-0,39	0,4<…
RAM	Funchal	32º38’	16º54’	58	19	28,5	27,6	26,7	25,8

Tabela 19 – Determinação da temperatura de projeto

Por conseguinte, o módulo de deformabilidade foi corrigido para:

Camada betuminosa	Espessura da camada betuminosa (m)	$T_{projeto}$ (ºC)	Td (ºC)	$E_{T/projeto}$ (MPa)	
				Camada de Desgaste	Camada de Regularização
SR1	0,055	28,5	22,1	801,8	1748,0
SR2	0,055	28,5	22,1	801,8	825,9
SR3	0,245	26,7	25,4	670	
SR4	0,035	28,5	20,9	767,0	567,0

Tabela 20 – Módulos de deformabilidade das camadas betuminosas para a temperatura de projeto

4.2. TRÁFEGO DE PROJETO

O tráfego presente e futuro é um dos fatores mais importantes em qualquer dimensionamento de um pavimento pois, caso atinja valores superiores à estimativa de projeto o pavimento terá, em princípio, uma vida útil inferior (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Na determinação do tráfego para dimensionamento da reparação teve-se em conta que nem o trecho piloto nem as estradas e ramos que lhe dão acesso imediato estão equipados com contadores de tráfego dispondo-se, quanto a contagens, de:

i) Vários recenseamentos de tráfego realizados de 2008 a 2011 pela EXACTO - Sociedade de Estudos e Planeamento, Lda. para a Direção Regional de Estradas (DRE).

ii) Recenseamento de tráfego realizados em 2015 junto à rotunda da Praça D. Francisco Santana (Hospital Dr. Nélio Mendonça) pela Câmara Municipal do Funchal (CMF);

iii) Filmagem do trecho realizada em 23 de janeiro de 2017 e registos de tráfego dos sublanços 8 e 9 da VR1, cedidos pela VIALITORAL.

O horizonte de projeto considerado no projeto de reabilitação deste pavimento rodoviário flexível foi de 10 anos (Mello, Farias, Preussler, & Preussler, 2016).

4.2.1. Projeção com base nas taxas de crescimento históricas

Para permitir estabelecer uma relação entre o tráfego recenseado a 21 de fevereiro de 2015 pela CMF com o de 23 de janeiro de 2017 desagregou-se esta última contagem por dois períodos: no total diário e no período das 7 às 20 h:

2017	Ligeiros	Pesados	Total	%pesados
Contagem das 7 às 20h	20.311	521	20.832	2,5 %
Contagem em 24h	23.103	551	23.903	2,3 %

Tabela 21 - Contagem com auxilio de uma filmagem, 23/01/2017

Admitiu-se então que a distribuição horária de tráfego no dia de contagens da CMF fosse aproximada à verificada no dia da contagem de 2017 e nos mesmos períodos e, nessa base, "estimou-se" o total de tráfego diário, por proporcionalidade direta, através de:

$$T_{2015}^{24h} = \frac{T_{2017}^{24h} \times T_{2015}^{13h}}{T_{2017}^{13h}} \quad (46)$$

A Tabela 22 sintetiza essa estimativa:

2015	Ligeiros	Pesados	Total	% pesados
Contagem das 7 às 20h	19.386	488	19.874	2,5%
Estimativa em 24h	22.051	516	22.567	2,3 %

Tabela 22 - Contagem da CMF, 21/05/2015 e estimativa de tráfego

O histórico de "contagens" disponíveis no trecho é aproximadamente o seguinte:

Ano	2008	2009	2010	2011	...	2015	...	2017
Dados	18.955	23.192	24.139	23.660		22.567		23.903

Tabela 23 - Variação do tráfego passado ao longo dos anos

Um desses registos, mais precisamente o de 2008, pareceu desde logo incongruente por ser pouco crível que, apenas num ano, de 2008 para 2009 e sem um fator de contexto que o justificasse, se tivesse assistido a 22,4% de crescimento, de 18.955 para 23.192 veículos/dia.

Esse inusitado crescimento, estará com certeza relacionado com a abertura ao tráfego em outubro de 2009 da nova ligação em via expresso ao Porto do Funchal, ou seja, tem origem numa relevante alteração da topologia viária, fazendo com que se devam desprezar os registos anteriores. Tendo-se adicionalmente apurado que o recenseamento de tráfego de 2009 foi, pelo menos parte, realizado pela EXACTO também antes de outubro desse ano, não nos pareceu prudente utilizar o correspondente registo.

Assim, de 2010 até à contagem de janeiro de 2017, constatamos uma descida de tráfego, à taxa média anual na ordem de 0,1%. De 2015 para 2017 verificou-se, contudo, uma subida, a uma taxa média anual de 2,9% que, embora assente em dois registos muito recentes, se julga dever ser tida em conta para os propósitos deste trabalho.

O decrescimento anterior a essa retoma está associado, como é sabido, ao facto de Portugal e a RAM, a partir de 2010, terem começado a sofrer, primeiro, com a crise financeira internacional e, de seguida, com o evidenciar dos problemas de finanças públicas que

obrigaram o País e a Região a solicitarem apoio financeiro. Das medidas de austeridade subsequentes resultou uma forte redução dos rendimentos e emprego e da atividade económica só tendo a procura sido retomada em 2014. Ora, para projetarmos "procuras" futuras para o dimensionamento de pavimentos, não nos devemos basear em projeções de períodos recessivos.

Nesse quadro, a mais completa e adequada analogia para estimarmos o tráfego futuro do trecho a que conseguimos aceder baseou-se nos registos de tráfego da VR1, onde o respetivo TMDA teve uma clara tendência "sinusoidal", de contínuo crescimento até 2009, depois, de decrescimento de 2010 a 2013 e, mais recentemente, de retoma de crescimento, a partir de 2014.

Daí que, para estimar a evolução de tráfego, se tivesse preferenciado o último período de dados "disponíveis" do trecho, i.e., num período em que se tem a certeza de corresponder a crescimento da procura.

Em conformidade, admitindo que as contagens disponíveis de 2015 e de 2017 possam ser significativas do TMDA desses mesmos anos, calculou-se então, a respetiva taxa de crescimento médio anual e utilizou-se essa razão para obter uma primeira estimativa do tráfego futuro no trecho, conforme a Tabela 24.

O tráfego total no trecho em 2027, segundo a taxa de crescimento média anual atrás referida e com referência ao ano de 2015, será de 31.867 veíc./dia:

Ano	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
t=2,3%	24.600	25.318	26.057	26.817	27.599	28.405	29.233	30.086	30.964	31.867

Tabela 24 - Fluxo de tráfego no trecho para um periodo de dimensionamento de 10 anos

4.2.2. Projeção com base no MACOPAV

Dispõe-se de uma contagem recente para o trecho, de 23 de janeiro de 2017, com um total de 23.903 veíc./dia, com uma percentagem de veículos pesados de 2,3%.

O MACOPAV preconiza o dimensionamento dos pavimentos rodoviários a partir da estimativa do número acumulado de passagens de eixos padrões (N^{p}_{kN}) no horizonte de anos do projeto (p). Essa estimativa é obtida tendo por base o tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura ($TMDA_p$), por sentido de circulação e na via mais solicitada, a que se lhe aplica um fator de crescimento (função da taxa de crescimento anual (t) e do horizonte (p)) e um coeficiente de agressividade.

Note-se que o fator de crescimento do número acumulado de passagens do eixo padrão é função, mas não se confunde com a taxa de crescimento médio anual.

Para a taxa de crescimento médio anual de 3% subjacente aos cálculos do MACOPAV o tráfego total no trecho em 2027, será de 32.124 veíc./dia, conforme tabela abaixo:

Ano	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
t=3,0%	24.620	25.359	26.119	26.903	27.710	28.541	29.398	30.280	31.188	32.124

Tabela 25 - Fluxo de tráfego no trecho para um periodo de dimensionamento de 10 anos

O MACOPAV considera diversas classes de tráfego médio diário anual de veículos pesados, em cada sentido e na via mais solicitada, lidando-se neste caso prático com uma classe de

tráfego T_5 para o qual é recomendada a taxa de crescimento médio anual de 3% que, no final de um horizonte de 10 anos, conduz a um $TMDA_p$ de 247 veíc./dia em 2017 nas vias direitas mais solicitadas e a um N_{130}^{10} igual a 621.110 passagens.

4.2.3. Projeção com base em analogias com a procura na VR1

A VIALITORAL cedeu registos do tráfego na VR1 e as respetivas estimativas futuras que, dada a sua qualidade e profundidade, foram tidas em conta neste trabalho.

Os modelos de predição de tráfego utilizados pela VIALITORAL, elaborados pela VTM - Consultores em Engenharia e Planeamento, assentam numa média de cenários (pessimista e otimista) tendo em conta:

i. Evolução do preço de combustíveis: o modelo de crescimento considera a evolução desta variável até 2025 em linha com as projeções do preço do barril de petróleo propostas pelo Banco Mundial. Em 2026 e 2027 considera uma evolução linear até 2030 considerando o valor projetado para esse ano. O exercício considera ainda o peso do Imposto sobre produtos petrolíferos (ISP) no preço final praticado ao público.

ii. Crescimento real do PIB nacional: utilizando as previsões de crescimento real do PIB Nacional como *"proxi"* para a evolução do PIB Regional. A projeção de crescimento real do PIB Nacional foi atualizada com base nas mais recentes projeções de PIB, disponibilizadas pelo Banco de Portugal (para 2018 e 2019) e pelo "*The Economist Intelligence Unit*" (EIU), para os anos seguintes.

iii. Evolução das vendas de cimento: a série considerada foi atualizada com o valor observado em 2016 (último ano completo)

Ora, o tráfego que circula no trecho provém de três origens, identificadas na Figura 35.

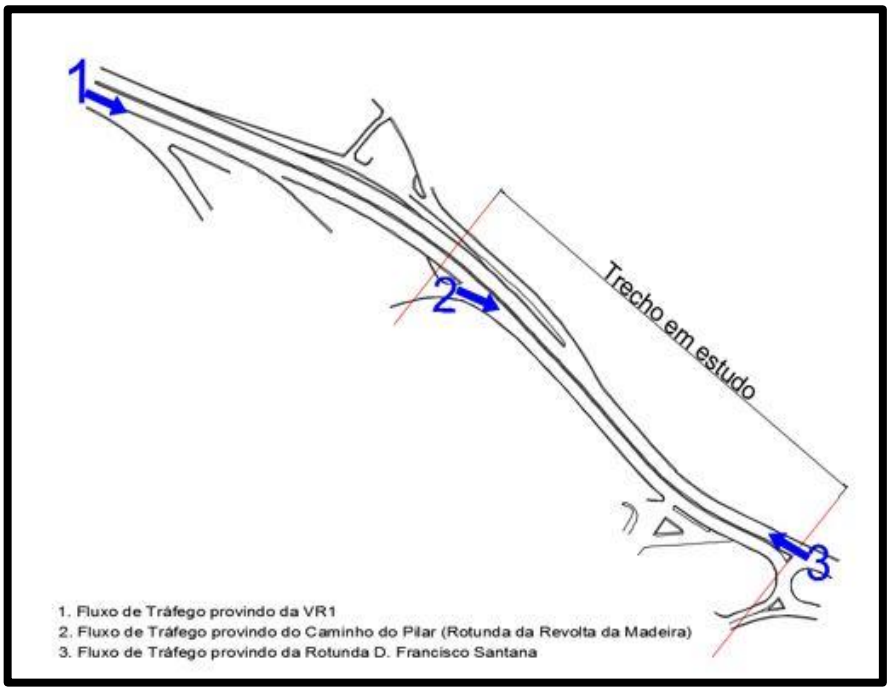


Figura 35 - Esquematização do trecho, pertencente à ERº115

No sentido descendente, temos os seguintes contributos de tráfego:

2.1. Provindo da VR1, mais precisamente das duas vias direitas, sentido crescente, do sublanço 8 e de parte da via esquerda do sublanço 9, sentido decrescente (Figura 36). Antes de entroncar com o Caminho do Pilar no trecho o tráfego descendente da Estrada da Liberdade tem ainda duas saídas, uma para a rotunda da Revolta da Madeira/Caminho do Pilar e outra para o acesso ao Porto do Funchal (ER116).

2.2. Provindo do ramo de acesso da rotunda da Revolta da Madeira, através do Caminho do Pilar.

1. No sentido ascendente, o tráfego tem origem exclusiva na rotunda D. Francisco Santana (3). Esse tráfego a jusante do trecho, é:

a. Diminuído pelo tráfego que sai para a rua da Levada do Cavalo;

b. Aumentado com a confluência provinda do acesso ao Porto do Funchal (ER 116);

c. Diminuído com o tráfego que sai para a rotunda do Caminho do Pilar e aumentado com o que entra a partir daí;

d. Dividido junto à sede da VIALITORAL, para os sublanços 8, sentido decrescente e 9, sentido crescente (Figura 36).

O sublanço 8 da VR1 integra "*loops*" de indução eletromagnética em cada uma das suas vias, 4 no sentido crescente e 3 no sentido decrescente. Já o sublanço 9 da VR1 integra 4 "*loops*" dois em cada sentido, crescente e decrescente.

Legenda:

Contador/Classificador Automático de Veículos;
Sublanço 8;
Sublanço 9;
Trecho
✘ Sede da VIALITORAL

Figura 36 – Esquematização da planta das vias dos sublanços 8 e 9, ligação ao trecho

A representação esquemática dos contadores da VR1 é apresentada nas seguintes figuras:

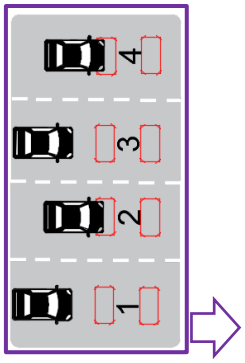


Figura 37 - Distribuição dos “loops” do contador do sublanço 8 no sentido crescente

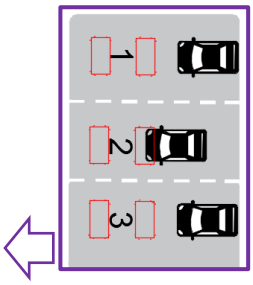


Figura 38 - Idem do sublanço 8 no sentido decrescente

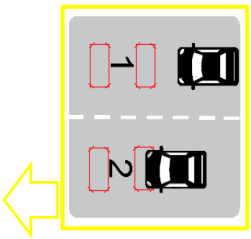


Figura 39 - Idem do sublanço 9 no sentido decrescente

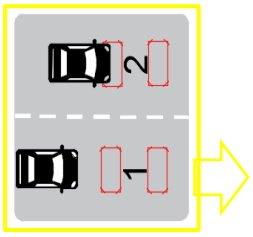


Figura 40 - Idem sublanço 9 no sentido crescente

As contagens do trecho piloto, nos dois sentidos, e as dos sublanços 8 e 9 da VR1, por via, no dia 23/01/2017 e nos sentidos pretendidos constam no Anexo IV.

Neste trabalho, testou-se a validade de quatro diferentes modelos de correlação do tráfego nos sublanços 8 e 9 da VR1, para selecionar um e, a partir das respetivas estimativas futuras de tráfego da VTM, inferir qual a taxa de crescimento média anual implícita e, se mais exigente, alterar o crescimento preconizado pelo MACOPAV.

Dos quatro modelos (vide Anexo IV) o que apresentou menores erros padrões e r^2 mais elevado proporcionando estimativas com sentido para todos os coeficientes é o seguinte:

$$T = T_{desc} + T_{asc}$$

$$T_{desc} = K_1 . T_{8cresc(1,2,3)} + K_2 . T_{9decresc(1,2)-8decresc(2,3)}$$

$$T_{asc} = K_3 . T_{8decresc(1)} + K_4 . T_{9cresc-8cresc(4)}$$

Variável de resposta	Variáveis previsoras	Coeficientes	Erro padrão	Significância estatística
Tráfego no sentido descendente	K_1	0,185	0,051	p = 0,001
	K_2	0,693	0,107	p < 0,001
Tráfego no sentido ascendente	K_3	0,920	0,275	p = 0,003
	K_4	0,249	0,104	p = 0,025

Tabela 26 – Modelo selecionado de regressão múltipla para o trecho piloto

Para este modelo, no sentido descendente, apenas se consideram as contagens das três vias mais à direita (1, 2, 3) do sublanço 8 no sentido crescente da VR1, pois são as vias que fazem ligação ao trecho. Posteriormente, ao fluxo de tráfego contabilizado pelo contador do sublanço 9 no sentido decrescente, é-lhe retirado o tráfego das vias mais à esquerda (2, 3) do sublanço 8 no sentido decrescente.

Para o sentido ascendente do trecho, considera-se o fluxo de tráfego contabilizado na via mais à direita do sublanço 8 no sentido decrescente da VR1. A outra fonte é contabilizada pelo contador do sublanço 9 no sentido crescente, sendo-lhe retirado o tráfego do sublanço 8 no sentido crescente, mais precisamente o contabilizado pela via mais à esquerda (4).

O modelo força contudo a que a regressão passe pela origem do referencial, equivalente a pressupor que a tráfego nulo nos sublanços 8 e 9 da VR1 corresponda um tráfego nulo no

trecho piloto, o que apenas tendencialmente verdadeiro pois há tráfego contribuinte sem origem na VR1.

As previsões de tráfego resultantes deste modelo integram uma atenuação da procura conduzindo a uma taxa de crescimento médio anual da ordem de 1,1% e, em valores absolutos, a tráfego consideravelmente inferior ao das duas previsões anteriormente estudadas.

ANO	VTM		Modelo 4		
	Sublanço 8	Sublanço 9	$T_{descendente}$	$T_{ascendente}$	T_{TRECHO}
2017	54.435	55.735	11.174	12.988	24.163
2018	55.444	56.771	11.383	13.229	24.612
2019	56.379	57.730	11.575	13.453	25.028
2020	57.275	58.649	11.760	13.667	25.426
2021	58.132	59.528	11.936	13.871	25.807
2022	58.839	60.253	12.082	14.040	26.122
2023	59.444	60.874	12.206	14.185	26.391
2024	59.944	61.387	12.309	14.304	26.614
2025	60.335	61.789	12.390	14.398	26.788
2026	60.673	62.135	12.459	14.478	26.938
2027	60.957	62.426	12.518	14.546	27.064

Tabela 27 - Evolução do tráfego com base nas estimativas VTM, segundo Modelo 4

A título de resumo, a tabela seguinte ilustra as estimativas de TMDA para o trecho num período de dimensionamento de 10 anos, de três formas distintas:

Crescimentos	Mantendo o crescimento dos dois últimos anos	Respeitando a taxa do MACOPAV	Modelo VTM
TMDA (2027)	31.867	32.124	27.064

Tabela 28 – Projeção de tráfego para 2027

Prudencialmente, por ter conduzido a um maior valor de tráfego e por subsequentes análises de sensibilidade permitirem inferir que a consideração de tráfego inferior não conduziria a importantes diferenças no dimensionamento, preferenciaram-se os critérios de fixação de tráfego do MACOPAV.

4.3. SOLUÇÕES DE REFORÇO PARA O TRECHO PILOTO

No capítulo 2 descreveram-se várias técnicas de reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis sendo evidente que, para o caso em estudo, uma mera reabilitação superficial não é adequada devido aos problemas estruturais também identificados, tendo o mesmo de ser reforçado da forma tradicional com a substituição total, ou parcial, das misturas betuminosas pré-existentes (p.e., substituição integral da camada de desgaste) ou com soluções alternativas equivalentes.

A solução alternativa que nos interessa testar é, por razões já desenvolvidas anteriormente, é a da reabilitação com reforço do pavimento recorrendo a misturas betuminosas com RAR.

Para a justificação da estrutura de reforço encontrada, foram interpretados os resultados de ensaios de carga e das sondagens realizadas. A partir desses resultados, e da atribuição de valores para as características mecânicas das várias camadas existentes, elaborou-se o modelo do comportamento estrutural do pavimento, o qual permite efetuar os cálculos de verificação da capacidade de carga.

O dimensionamento do reforço recorreu ao cálculo dos estados de tensão e deformação induzidos no pavimento pelas passagens de um eixo padrão de 130 kN.

Tendo por base os valores de tráfego obtidos foi utilizado, no dimensionamento do reforço do pavimento, o valor de tráfego acumulado de eixos padrão de veículos pesados (N_{130}^{10}) de $6{,}21 \times 10^5$ tendo em atenção as camadas existentes no pavimento degradado e respetivas características mecânicas através do cálculo dos estados de tensão e de deformação induzidos no pavimento pelos veículos, por correspondência com os estados limites de ruína do pavimento.

Sendo as misturas betuminosas caracterizadas pelos módulos de deformabilidade e pelo comportamento à fadiga, deformação permanente e reflexão de fendas, o dimensionamento do reforço do pavimento utilizou o método da Shell na modelação matemática do seu comportamento.

4.3.1. Reabilitações estruturais estudadas

Para a reabilitação do pavimento do trecho piloto estudaram-se, tentativamente, em termos de custo-benefício, quatro soluções:

i. Camada grossa ThinGap, com RAR: Consistindo, grosso modo, na fresagem de 5 cm da camada de desgaste e sua reposição por uma nova de igual espessura de ThinGap com RAR, ou seja, com mistura modificada otimizada, requerendo otimização da granulometria envolvida e incorporação de 40% de RAR ao ligante, i.e., relativamente a uma mistura tradicional aumentando a percentagem de betume na mistura de 5% para cerca de 7,2% e a que acresce 4,8% de RAR;

ii. Camada fina de ThinGap: Compreende fresagens localizadas, apenas onde se justifique, procedendo-se à aplicação, em sobreposição, de uma camada de 3 cm de ThinGap com RAR;

iii. Solução tradicional: Utilizada nas reparações das redes concessionadas a privados na RAM consistindo, grosso modo, na fresagem de 5 cm da camada de desgaste e sua reposição por uma nova com mistura betuminosa convencional (AC14 surf 35/50), com o agregado tipo e cerca de 5% de betume, i.e., com 0% de RAR no ligante;

iv. Tradicional com betume “semi-modificado” com RAR: Idem, mas apenas com mistura betuminosa enriquecida por RAR, ou seja, solução sem qualquer otimização do agregado tipo e descendo a percentagem de betume dos 5% para cerca de 4,25%, i.e., com 15% de RAR no ligante.

Em todas as soluções descritas pressupôs-se que, se necessário, o substrato que receberá a nova camada será sujeito a adequada selagem e, obviamente, a rega de colagem sendo expectável que o tratamento superficial da fendilhação exigível na base das camadas fresadas seja consideravelmente inferior ao que a reutilização do atual pavimento, tal como está, venha a exigir.

4.3.1.1. Características da mistura proposta com RAR.

Não especificando o CEEP os requisitos a observar nas soluções estruturais que se pretendem testar, as características físicas e mecânicas das misturas betuminosas com borracha ThinGap com RAR utilizadas foram as seguintes:

Características da mistura ThinGap com RAR		Valores exigidos
Número de pancadas em cada extremo do provete		75
Porosidade	(%)	2,5≤V≤5,5
Vazios da mistura de agregados (VMA)		≥ 20
Índice de resistência conservada		≥ 70
Percentagem de ligante mínima		10,0 ± 0,3
Força de rotura mínima	(N)	8000

Tabela 29 - Requisitos mínimos exigidos à mistura betuminosa ThinGap com RAR

4.3.1.1.1. Agregados

Os agregados utilizados na mistura betuminosa devem ser limpos, duros, pouco alteráveis sob a ação dos agentes climáticos e abarcarem adequada adesividade ao ligante.

Na mistura utilizaram-se os inertes presentes na Tabela 30.

Designação Comercial	Procedência	Granulometria
Pó de Pedra	AFAVIAS – Câmara de Lobos	0/4
Brita 1	AFAVIAS – Câmara de Lobos	4//12
Brita 2	AFAVIAS – Câmara de Lobos	10/20

Tabela 30 - Agregados a utilizar na mistura betuminosa ThinGap com RAR

Os agregados foram submetidos aos ensaios previstos nas Normas Europeias da série 12697 (CEEP, 2014) constatando-se que, não obstante a qualidade não seja a melhor, cumprem os valores limites especificados (Anexo II).

Garantidas as características físicas exigíveis dos agregados e antes de qualquer estudo de composição da mistura betuminosa, foi necessário obter um material granular cuja curva granulométrica apresentasse o melhor contributo à mistura betuminosa.

A composição que melhor se ajusta aos materiais escolhidos para a mistura proposta para a RAM, foi definida com base na aplicação *i-MIX Design* que, em função das características dos materiais utilizados, definiu a curva que, previsivelmente, otimizará o desempenho da mistura.

Peneiros série base + 2 (mm)	% Passado
10,000	100,0
4,000	32,6
2,000	20,6
0,063	4,0

Tabela 31 - Curva granulométrica definida pelo i-Mix Design

Ou seja, de acordo com este método o resultado para a combinação de agregados sem ligante, vulgarmente conhecida como mistura seca, será um conjunto composto pelas seguintes partes percentuais:

- Brita 4/12: 60%

- Brita 0/4: 40%

Foi assim com esta combinação percentual de agregados que se formulou uma nova mistura betuminosa do tipo ThinGap com RAR, para a reparação em estudo. A folha de resultados obtida pelo *i-MIX Design* encontra-se no Anexo AIII.3.

4.3.1.1.2. Aditivo

Adicionou-se RAR por forma a perfazer 40% da totalidade do ligante (betume + RAR).

4.3.1.1.3. Ligante

Para a formulação da mistura foi utilizado um betume de pavimentação marca REPSOL, classe 35/50, em conformidade com a EN 12591, conforme Anexo II. Segundo o fabricante, o betume utilizado apresenta penetração de 45 mm quando ensaiado durante 5 s a 25 ºC e sujeito a uma carga de 100 g com ponto de amolecimento de 55 ºC.

Características	Norma	Resultado (%RAR)				
		0	20	25	30	35
Penetração, 25ºC, (mm/10)	ASTM D 5-97	35	30	24	20	17
Ponto de amolecimento, (ºC)	ASTM D 36	55	62	64	67	80
Resiliência, (%)	ASTM D 5329-96	17	33	39	45	50
Viscosidade absoluta a 175ºC, (cP)	AASHTO TP 48	118	750	1175	2500	3900

Tabela 32 - Resultados do betume combinado, com diferentes % RAR

Propriedades	Betume 35/50				
	Aditivo, RAR (%)				
	0	20	25	30	35
Grau PG	70-22	94-16	100-10	106-10	118-10

Tabela 33 - Resultados do Grau PG para 0, 20, 25, 30 e 35% de RAR

A modificação do betume convencional foi executada em laboratório com adição ao betume a 170 ºC de diferentes percentagens de RAR, com controlo da temperatura por termómetro digital imerso.

Como referido no capítulo 3 recorreu-se ao ensaio MSCR para verificar o tipo de tráfego mais adequado à mistura betuminosa, de acordo com a norma AASHTO TP 70.

MSCR	Betume 35/50				
	Aditivo, RAR (%)				
	0	20	25	30	35
Média de Recuperação (0,1 kPa, %)	23,5	78,1	83,3	86,7	89,0
Média de Recuperação (3,2 kPa, %)	14,1	64,3	74,2	82,8	86,7
Diferença entre a % média de 0,1 kPa e de 3,2 kPa (%)	40,41	17,66	10,92	4,51	2,54
Jnr (0,1 kPa)	0,600	0,027	0,015	0,008	0,005
Jnr (3,2 kPa)	0,705	0,045	0,023	0,010	0,006
Diferença entre o Jnr de 0.1 kPa e de 3.2 kPa (%)	17,20	66,15	56,75	32,35	21,05

Tabela 34 - Resultados dos ensaios MSCR

Segundo a Tabela 34, a ThinGap formulada para a RAM adequa-se à passagem de veículos extremamente pesados, como ilustrado graficamente no Anexo II.

A quantidade ótima de ligante betuminoso a ser utilizada na mistura betuminosa ThinGap também foi estabelecida pelo *i-Mix Design* estando resumida na Tabela 35.

Ligante betuminoso na mistura	12,0 %	**Betume 35/50**	60,0 %
		RAR	40,0 %

Tabela 35 - Características do ligante betuminoso utilizado na mistura betuminosa

4.3.1.1.4. Caracterização do comportamento mecânico da mistura

A caracterização específica para o comportamento desta mistura betuminosa, a nível estrutural e funcional, passou por um estudo experimental que se apresenta em seguida e que passou por determinar o seu comportamento à deformação permanente, à fadiga, à sensibilidade à água e ainda, pela avaliação da sua resistência à derrapagem e à desagregação do material.

4.3.1.1.4.1. Resistência às deformações permanentes

A avaliação da resistência da mistura betuminosa à deformação permanente foi feita com recurso ao ensaio de *Wheel Tracking*, por medição do cavado de rodeira. A avaliação foi feita com base em registos automáticos e informáticos que transferem os valores da profundidade média do cavado de rodeira PRD_{AIR} e a unidade da taxa de deformação média WTS_{AIR}, apresentando-se na Tabela 36 e no Anexo AIII.4 os resultados obtidos.

% de Ligante (40% RAR)	**Wheel Tracking**			**Previsto pelo i-Mix Design**		
	PRD_{AIR} (%)	**WTS_{AIR} (mm/10^3 ciclos)**	**RD_{AIR} (mm)**	**PRD_{AIR} (%)**	**WTS_{AIR} (mm/10^3 ciclos)**	**RD_{AIR} (mm)**
12,0	2,4	0,02	1,2	5,0 – 5,4	0,07	2,5 – 2,7

Tabela 36 - Resultado do ensaios de *Wheel Tracking*

Em regra, quanto maior é a quantidade de ligante que uma mistura betuminosa contém na sua formação, menor é, em princípio, a sua resistência à deformação permanente. Assim, dada a elevada percentagem de ligante betuminoso (12%) utilizado seriam, porventura, de esperar resultados inferiores aos obtidos do que aqueles que a nova mistura betuminosa acabou por apresentar.

Como se observa na Tabela 36, o *i-Mix Design* esteve longe de conseguir prever um comportamento tão notável da mistura no que respeita à deformação permanente aspeto que deverá ser tido em conta em projetos futuros, demonstrando a necessidade de se calibrar o método para misturas com RAR.

Os extraordinariamente bons resultados da nova mistura encontram explicação na utilização de frações granulométricas de maior dimensão e grande resistência à rotura do inerte (o que só foi possível através do empenho da central de britagem) mas tem também de se salientar que a utilização de agregados de maiores dimensões só foi possível por a RAR ter capacidade para preencher os vazios do agregado.

4.3.1.1.4.2. Resistência ao fendilhamento por fadiga

Nos ensaios ao fendilhamento por fadiga, novamente os resultados previstos pelo *i-Mix Design* foram largamente superados duplicando, no mínimo, o módulo esperado. A Tabela 37 demonstra o referido anteriormente acerca das misturas betuminosas com RAR, ou seja, que a mesma confere à mistura betuminosa excelente resistência à fadiga e à reflexão de fendas

devido à diminuição do módulo de deformabilidade em temperaturas de serviço, permitindo maior flexibilidade da mistura.

% de Ligante (40% RAR)	Flexão de 4 pontos		Previsto pelo i-Mix Design
	Módulo da Mistura (MPa)	$N_{\varepsilon\ 500}$ (10 Hz; 20ºC)	Módulo da Mistura (MPa)
12,0 %	4296	10.000.000	1314 - 2073

Tabela 37 - Resumo dos resultados obtidos com o ensaio à fadiga da mistura betuminosa ThinGap

4.3.1.1.4.3. Resistência à derrapagem

Recorreu-se ao pêndulo britânico (EN 13036-4:2003) para determinar o coeficiente de atrito da mistura com RAR obtendo-se os resultados constantes do Anexo AIII.5, que evidenciam um coeficiente de atrito pontual médio (PVT) de 85, superior, novamente, ao esperado de acordo com o *i-Mix Design* e reforçando a convicção da necessidade de se calibrar este método para misturas com RAR.

Características	Ensaio	Misturas Convencionais (CEEP)	MBR-BMB (LNEC, 2007)	*ThinGap*	Previsto pelo *i-Mix Design* (*ThinGap*)
Resistência à derrapagem	Pendulo Britânico	≥ 60	≥ 70	85	59,2

Tabela 38 - Características típicas da resistência à derrapagem de misturas convencionais e com BMB

O resultado demonstra uma excelente aderência ao contacto entre pneu/pavimento, devido ao aumento da viscosidade que a RAR incute à mistura betuminosa associado à elevada quantidade de ligante (12%).

4.3.1.1.4.4. Sensibilidade à ação da água

Na Tabela 39 apresentam-se os principais resultados obtidos na "resistência conservada" (ITSR) para avaliação à sensibilidade da mistura betuminosa à água.

Designação	Grandeza	Resultados obtidos no ensaio à sensibilidade à água
Grupo seco	ρ_m (Mg/m^3)	2,370
	V_m (%)	5,8
	ITS_d (kPa)	1190
Grupo imerso	ρ_m (Mg/m^3)	2,362
	V_m (%)	6,1
	ITS_w (kPa)	1088
ITSR (%)		91

Tabela 39 - Resultados do ensaio à sensibilidade à água da mistura betuminosa desenvolvida para a RAM

A Tabela 39 evidencia um resultado de resistência da mistura à tração indireta (ITSR) de 91%, valor que respeita o mínimo exigido pelo CEEP comprovando que a mistura tem boa qualidade para resistir à perda de adesividade entre o betume e o agregado.

4.3.1.1.4.5. Resistência à desagregação

A avaliação da desagregação da mistura pelos efeitos abrasivos do tráfego foi avaliada com recurso à máquina Los Angeles – Ensaio Cântabro com os resultados constantes do Anexo AIII.6 e da Tabela 40.

Mistura betuminosa	Condições	Cântabro (%)
THINGAP (12% Ligante Betuminoso)	Perda por desgaste em Grupo seco	5,0
	Perda por desgaste em Grupo imerso	4,9
	(Seco/imerso)	102

Tabela 40 - Resistência à desagregação da mistura ThinGap, formulada para a RAM

A mistura betuminosa apresentou excelente resistência à desagregação dos materiais, tanto em condições secas como molhadas devido ao elevado teor de ligante da mistura (12%) e elevada viscosidade da mesma, pela presença de 40% de RAR no ligante.

4.3.2. Reforço com camada grossa ThinGap, com RAR

A primeira solução de reparação estudada passa por uma fresagem de 5 cm do pavimento existente e colocação de uma mistura betuminosa nova de igual espessura em ThinGap com RAR.

Tendo por referência estudos realizados por flexão de 4 pontos e considerando uma temperatura média no pavimento de cerca de 24ºC, adotou-se:

ThinGap com RAR	Ligante betuminoso		% ligante	V_b (%)	Módulo de deformabilidade (MPa)
	35/50	RAR	12	16	4000

Tabela 41 - Características da mistura betuminosa ThinGap com RAR considerada

Com recurso ao programa de cálculo automático BISAR 3.0 determinaram-se as extensões máximas admissíveis na base das camadas betuminosas e no topo do solo de fundação, a saber:.

Camadas	Reforço	Regularização	Base + Sub-Base	Fundação
Espessuras (cm)	5,00	20,00	25,00	-
Módulos de Deformabilidade (MPa)	4000	1000	100	50
$\varepsilon_{t\ adm}$ (10^{-6})	47	365	---	---
V_b (%)	16	9	---	---
$N_{adm,fad}$	$1{,}60\times10^{10}$	$5{,}09\times10^{5}$	---	---
$\varepsilon_{c\ adm}$ (10^{-6})	---	---	740	663
$N_{adm,def}$	---	---	$3{,}50\times10^{5}$	$5{,}43\times10^{5}$
Critério de ruína condicionante	Deformação permanente			
N^{10}_{130} (2027)	$6{,}21\times10^{5}$			
Dano (2027) (%)	0	122	**177**	114

Tabela 42 - Caracterização do projeto proposto para a reabilitação do pavimento em ThinGap com RAR

O fendilhamento à fadiga não tem significado constatando-se que o critério de ruína condicionante é o da limitação da extensão vertical de compressão no topo da base granular do pavimento existente.

Contudo, como na já longa vida do pavimento do trecho piloto (durante a qual foi sujeito a significativa compactação) as deformações existentes nem são muito significativas, será algo improvável a cedência do pavimento independentemente de, na modelação, ser a deformação permanente o critério de ruína condicionante.

Para a avaliação da propagação de fendas para a camada de reforço, recorreu-se à aplicação iterativa "*Reflective Cracking Overlay Design*" (Sousa, Pais, Saim, & Way, 2002), introduzindo as condições do pavimento e as temperaturas do local e gerando um gráfico que, combinado com o tráfego em causa, nos devolveu a espessura mínima de reforço necessária para controlar o grau de fendilhamento adotado.

Conclui-se assim que a espessura de 5 cm de mistura betuminosa ThinGap com RAR é suficiente para resistir ao aparecimento de fendas à superfície da camada de desgaste, no período de dimensionamento projetado (10 anos), apontando o Gráfico 5 para que a espessura mínima necessária para evitar o aparecimento de fendas à superfície da camada de reforço seja de 2 a 3 cm.

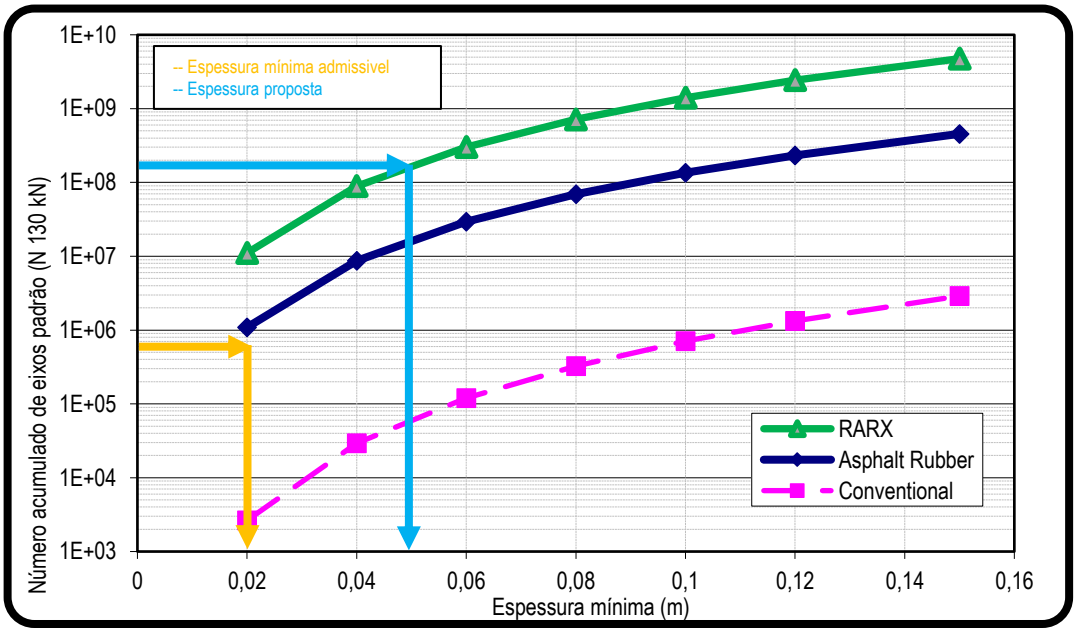


Gráfico 5 – Dimensionamento da camada de reforço para 1 % de reflexão de fendas

Segundo o Gráfico 5, a solução projetada tem a capacidade de suportar um número admissível de passagens de eixos padrão de 200 milhões, traduzindo-se numa vida útil estimada para resistir ao fendilhamento devido ao corte de 160 anos. Contudo um pavimento rodoviário com borracha não permite uma durabilidade superior a 20 anos, pois após determinado período a estrutura começa a apresentar um envelhecimento mais acentuado, perdendo qualidades estruturais e funcionais. Nesse sentido, tendo em conta que se trata da reabilitação de um pavimento e não de um projeto inicial de um de pavimento a construir, considerou-se um período de vida útil nesta solução de 15 anos.

Devendo-se considerar outros fatores na determinação da vida útil de uma estrutura rodoviária (p.e. fendilhamento devida à fadiga e deformação permanente), a Tabela 42 aponta para uma vida útil de 15 anos que o pavimento apenas apresente como critério de ruína a deformação permanente, algo que não é muito condicionante pois o pavimento não é novo e já se encontra bem compactado.

4.3.3. Reforço com camada fina de ThinGap

A segunda solução de reparação estudada passa pela utilização de uma mistura betuminosa ThinGap consiste na aplicação em sobreposição de uma camada de reforço com 3 cm dessa mesma mistura, sem fresagem do pavimento existente procedendo-se à selagem de fendas no pavimento existente antes da aplicação da camada de reforço.

As extensões máximas admissíveis na base das camadas betuminosas e no topo do solo de fundação são as indicadas na Tabela 43 e foram encontradas da mesma forma que a proposta anterior:

Camadas	Reforço	Desgaste	Regularização	Base + Sub-Base	Fundação
Espessuras (cm)	3,00	5,00	20,00	25,00	-
Módulos de Deformabilidade (MPa)	2500	800	1000	100	50
$\varepsilon_{t\ adm}$ (10^{-6})	---	73	329	---	---
V_b (%)	16	9	9	---	---
$N_{adm,fad}$	---	$8{,}57x10^{9}$	$8{,}56x10^{5}$	---	---
$\varepsilon_{c\ adm}$ (10^{-6})	---		---	666	568
$N_{adm,def}$	---		---	$5{,}34x10^{5}$	$1{,}01x10^{6}$
Critério de ruína	Deformação permanente				
N_{130}^{10} (2027)	$6{,}21x10^{5}$				
Dano (2027) (%)	---	0	73	**116**	62

Tabela 43 - Caracterização do projeto proposto para a reabilitação do pavimento em ThinGap com RAR

O fendilhamento à fadiga na camada de reforço é improvável. A ocorrer fendilhação só acontecerá por corte e nunca por tração, evidenciando uma das vantagens da aplicação de camadas betuminosas delgadas.

Da comparação do número acumulado de passagens de eixos padrão a que o pavimento previsivelmente resistirá, no período de dimensionamento imposto, com o que se terá de confrontar conclui-se ser a deformação permanente o critério de ruína condicionante.

Dado que o eventual fendilhamento da camada de reforço provirá da reflexão de fendas do pavimento existente impôs-se avaliar a espessura mínima necessária para evitar a propagação de fendas até à superfície. Para o efeito recorreu-se à aplicação desenvolvida por (Sousa, Pais, Saim, & Way, 2002) que permitiu verificar que a espessura de 3 cm de ThinGap com RAR é suficiente para resistir ao aparecimento de fendas à superfície da camada de desgaste.

Segundo o Gráfico 6, a espessura proposta tem a capacidade de resistir a um acumular de passagens de eixos padrão de 130 kN de $3x10^{7}$ eixos. Para o período de dimensionamento avaliado de 10 anos, a espessura mínima necessária para evitar o aparecimento de fendas à superfície da camada de reforço seria de 2 cm.

Tal como já foi referido na solução grossa, adotando um dimensionamento conservativo, considerou-se um período de vida útil para pavimentos estruturados por uma camada betuminosa com ThinGap com RAR de 15 anos.

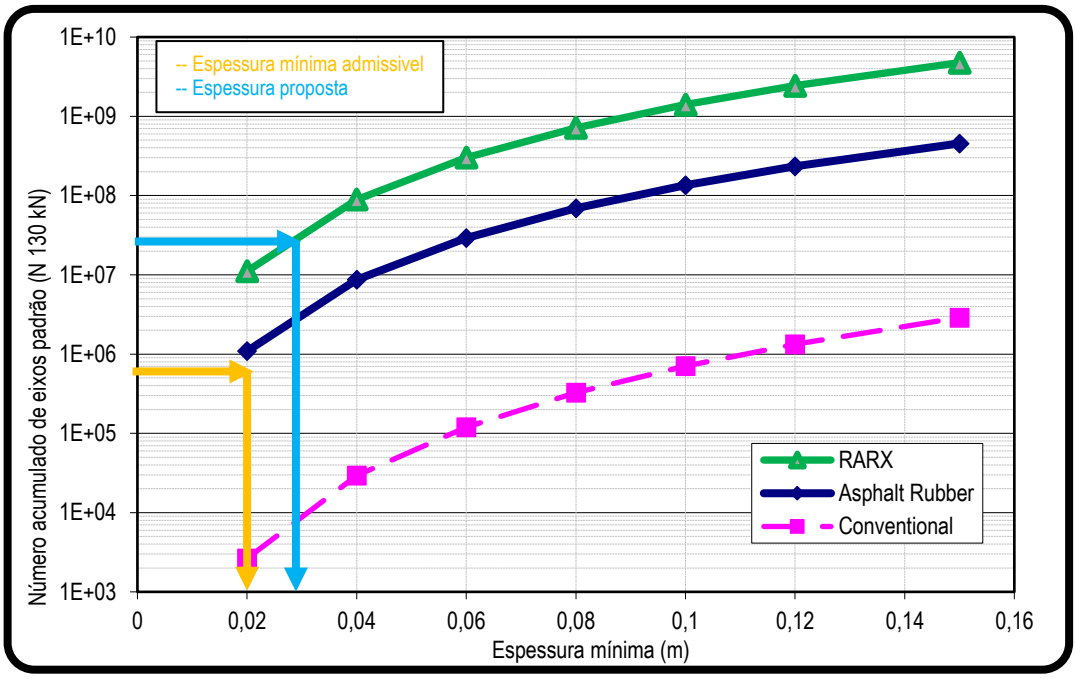


Gráfico 6 - Dimensionamento da camada de reforço para 1 % de reflexão de fendas

4.3.4. Reforço com solução tradicional

A terceira solução de reparação estudada passa pela reposição de uma camada com 5 cm de espessura em betão betuminoso (mistura betuminosa tradicional), após fresagem da camada superior em igual espessura.

A mistura betuminosa considerada no reforço é idêntica às utilizadas nas reparações de pavimentos da VR1 com um módulo de deformabilidade calculado considerando as temperaturas representativas da RAM e o betume envolvido. O módulo de deformabilidade da nova mistura betuminosa de 4.200 MPa foi determinado de acordo com a metodologia da Nottingham, já referenciada no capítulo 2, tomando-se uma temperatura média no pavimento de cerca de 24ºC e uma percentagem volumétrica de betume (Vb) de 5 %.

Betão Betuminoso	Espessura (m)	Tipo de betume	V_b (%)	Rigidez do betume (MPa)	Módulo de deformabilidade (MPa)
	0,05	35/50	5	22,13	4.200

Tabela 44 – Características da mistura betuminosa Betão Betuminoso

O dimensionamento do reforço do pavimento, ou seja, a avaliação do número acumulado de eixos padrão admissíveis (N_a), foi efetuado tendo por base a análise dos estados de tensão (ε_t) e deformação (ε_c) do pavimento, obtidos pelo BISAR 3.0, considerando as características mecânicas dos materiais a aplicar.

Tendo como referência o número acumulado de eixos padrão admissível, procedeu-se à verificação se o pavimento entrará, ou não, em ruína na vida útil mínima pretendida (10 anos) por correspondência para com o dano envolvido.

Camadas	Reforço	Regularização	Base + Sub-Base	Fundação
Espessuras (cm)	5,00	20,00	25,00	-
Módulos de Deformabilidade (MPa)	4200	1000	100	50
$\varepsilon_{t\ adm}$ (10^{-6})	53	364	---	---
V_b (%)	5	9	---	---
$N_{adm,fad}$	$5{,}04 \times 10^{7}$	$5{,}16 \times 10^{5}$	---	---
$\varepsilon_{c\ adm}$ (10^{-6})	---	---	736	659
$N_{adm,def}$	---	---	$3{,}58 \times 10^{5}$	$5{,}57 \times 10^{5}$
Critério de ruína condicionante	Deformação permanente			
N_{130}^{10} (2027)	$6{,}21 \times 10^{5}$			
Dano (2027) (%)	1	120	**174**	112

Tabela 45 – Caracterização do projeto proposto para a reabilitação do pavimento em Betão Betuminoso

Pela observação dos valores calculados, verifica-se que a extensão de tração na base da camada de reforço em betão betuminoso não é condicionante, quando comparada com a extensão admissível, dado as solicitações de tráfego previstas para o pavimento, durante o período de dimensionamento, serem inferiores às admissíveis.

Na avaliação da propagação de fendas para a camada de reforço, utilizou-se o programa iterativo (Sousa, Pais, Saim, & Way, 2002), considerando-se, para não penalizar injustificadamente as soluções tradicionais, uma percentagem de fendilhamento de 10 % como valor admissível de projeto, no limite do aceitável.

Dessa forma, verificou-se que a espessura de 5 cm preconizada para a camada de reforço será suficiente para resistir ao aparecimento de fendas à superfície da camada de desgaste, devido à reflexão de fendas existente na camada betuminosa do pavimento degradado.

Para esta solução estima-se um período de vida útil para o pavimento rodoviário de 10 anos, pois de acordo com o Gráfico 7 a estrutura intervencionada com uma solução tradicional, passados 10 anos, já apresentará uma percentagem de fendilhamento ao corte superior ao limite admissível.

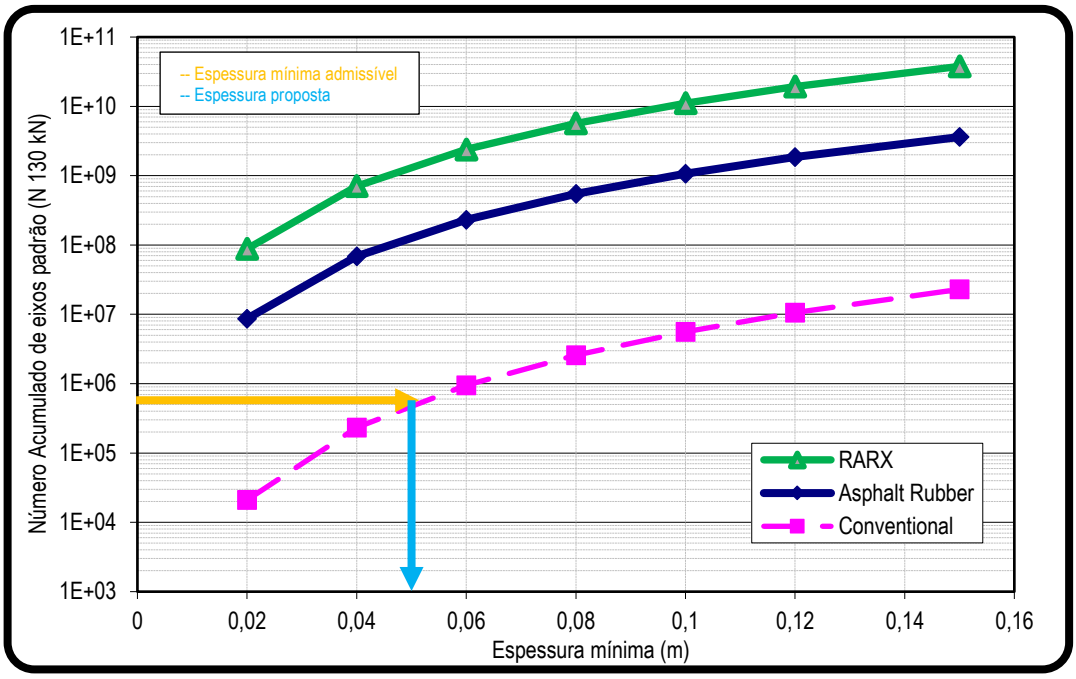


Gráfico 7 – Dimensionamento da camada de reforço para 10 % de reflexão de fendas

4.3.5. Reforço tradicional com betume "semi-modificado" com RAR

A quarta solução de reparação estudada é uma variante à solução tradicional limitando-se à substituição de parte do betume por RAR, modificando o ligante com o seu enriquecimento pela adição/integração no seu total de 15% de RAR. Essa adição de RAR não tem condições para se elevar mais por se ter verificado que a composição granulométrica típica dos agregados utilizadas na RAM e cedidos para o estudo ser muito contínua impedindo maior absorção de RAR.

Obviamente que a performance desta mistura betuminosa "semi-modificada" será significativamente inferior à da ThinGap mas sempre superior à performance de uma mistura tradicional relembrando-se a este propósito, estar adquirido, que o betume modificado com RAR só começa a apresentar resultados significativamente superiores aos da média para percentagens superiores a 25 % de RAR (Vide Anexo: AI.1).

O módulo de deformabilidade desta mistura betuminosa com RAR a colocar no reforço será inferior aos módulos de deformabilidade que as misturas betuminosas tradicionais apresentam (Sousa, Vorobiev, Ishai, Svechinsky, & Sousa, 2012) e superior ao da ThinGap com RAR.

Para o betão betuminoso com RAR, foi considerado uma percentagem volumétrica de betume (Vb) de 5%, correspondente a 85 % de um betume com penetração 35/50 e 15% de RAR.

Por não se ter avaliado laboratorialmente o comportamento mecânico desta mistura, admitiu-se, conservadoramente, que os estados limites de ruína da mesma seriam iguais aos da mistura convencional, apesar de estarmos convictos que apresentará importante melhorias, sobretudo em relação à fadiga.

4.4. AVALIAÇÃO SUMÁRIA DO PREÇO DAS SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO SUGERIDAS

Foi entendido como importante completar este trabalho com uma avaliação, ainda que sumária, dos preços relativos das diferentes soluções de reforço estudadas tendo em consideração a vida útil do pavimento.

Identificar, contudo, como se formam a totalidade dos preços unitários mostrou-se uma tarefa impraticável por colidir com segredos comerciais das empresas construtoras na medida em que respeitam a informações de atividades internas com valor económico efetivo ou potencial e cuja divulgação ou utilização pode proporcionar vantagens financeiras a outras empresas com elas concorrentes. Como segredos do negócio referimo-nos concretamente a informações técnicas e/ou financeiras relativas ao saber-fazer, método de cálculo de custos, segredos e processos de produção, fontes de abastecimento, quantidades produzidas e vendidas, estratégia comercial, estruturas de custos e de preços, política de vendas, etc..

A forma encontrada para contornar tais dificuldades foi considerar invariáveis na formação do preço das quatro soluções estudadas as componentes de “Administração e lucro”, de “Transporte e aplicação das misturas”, de “Reposição da Sinalização horizontal” e de “Projeto e Fiscalização”, i.e., considerou-se que todas essas componentes dos preços independem da solução escolhida.

Nesse quadro, contando apenas com as informações fornecidas pela entidade pública (DRE) partiu-se para análise possível aos preços numa base que, mesmo assim, julgamos nos permitir afirmar, com suficiente segurança, quais as soluções mais baratas.

Os preços foram construídos a partir de informações oferecidas pela DRE sofrendo ainda das seguintes condicionantes:

i. A pedra utilizada para a produção da brita do agregado é adquirida em bruto no mercado regional.
ii. O filer é composto por pó de pedra basáltico adquirido a privados.
iii. Os custos de aquisição do equipamento para a produção quer das britas quer das misturas estão totalmente amortizados.
iv. Não se contabilizam custos pela ocupação de solo (propriedade pública).
v. Os custos com a aquisição pela DRE do betume e do gasóleo resultam de processos concorrenciais recentes.
vi. Não foram ponderadas as influências da redução do ruído e dos incrementos de atrito proporcionados pela RAR que não são despiciendos.

Atento o exposto, o Anexo IX contém as quantificações dos demais pressupostos adotados para se chegar a um preço médio de produção das misturas.

A Tabela 46 resume os preços comparativos que se encontram para as quatro diferentes soluções estudadas com os preços complementares respetivos (p.e., necessidade ou não de intervir nos lancis e passeios) tendo em conta a diferenciada vida útil das soluções.

Solução de reabilitação proposta para o trecho piloto	Encargos previstos	Preço (€)
Camada grossa ThinGap	Trabalhos complementares	34.224
	Fornecimento e aplicação da mistura	42.853
	Preço de referência	77.077
	Preço comparativo com vida útil	**51.385**
Camada fina ThinGap	Trabalhos complementares	21.125
	Fornecimento e aplicação da mistura	25.698
	Preço de referência	46.823
	Preço comparativo com vida útil	**31.215**
Solução tradicional	Trabalhos complementares	34.224
	Fornecimento e aplicação da mistura	22.987
	Preço de referência	57.211
	Preço comparativo com vida útil	**57.211**
Solução tradicional com betume "semi-modificado" com RAR	Trabalhos complementares	34.224
	Fornecimento e aplicação da mistura	24.749
	Preço de referência	58.973
	Preço comparativo com vida útil	**49.144**

Tabela 46 - Tabela resumo dos preços comparativos à solução tradicional das diferentes soluções

Apresentando as soluções por ordem decrescente do seu preço comparativo, tendo em conta a respetiva vida útil, temos:

i. A solução de menor preço comparativo é, destacada, a da reabilitação com recurso a uma camada fina ThinGap com RAR. A redução de 45% de preço comparativo em relação à solução com mistura tradicional deve-se à maior longevidade considerada (15 anos), à utilização de menor quantidade de misturas (3/5) mesmo sendo, naturalmente, a mais cara (96,1 €/ton.) e, muito importante, a quase permitir dispensar fresagens, apenas necessárias onde o pavimento se apresenta com muito elevada degradação.

   A redução da espessura permite também diminuir o tempo de execução da obra, redução de custos de estaleiro e demais economias de aplicação (mão de obra e equipamento, transporte e combustíveis) que, contudo, têm uma expressão marginal, sobretudo num plano relativo.

ii. A solução tradicional com betume "semi-modificado" com RAR "classificou-se em segundo lugar". Apesar de corresponder a uma solução com uma adição limitada de RAR, ou seja, a um "*upgrade*" mecânico e funcional das características da mistura (54,05€/ton.) que é obviamente mais cara que a tradicional (50,2 €/ton.). A nível estrutural, ficamos perante uma solução de preço comparativo inferior ao da solução tradicional (menos 14%), sobretudo, por causa da maior vida útil;

iii. A solução de camada grossa em ThinGap com RAR sendo a de maior preço inicial acaba por ser a de terceiro melhor preço comparativo, isto porque, as vantagens da maior longevidade e qualidade da mesma são diminuídas por se ter de recorrer à mesma

espessura do que a da solução tradicional importando para a solução os custos de fresagens e os mais elevados gastos com a produção e aplicação das misturas.

O seu preço comparativo vantajoso para com a solução tradicional expressa o efeito da sua maior vida útil (15 anos) que, se tivéssemos sido menos conservativos, até poderia ter sido considerada maior (p.e., 20 anos) e a expressaria como mais vantajosa do que a solução com betume “semi-modificado”.

Deve, contudo, fazer-se notar que a necessidade de remover por fresagem a camada de desgaste degradada é exclusivamente geométrica pois não fora o facto do trecho piloto ser adjacente a lancis e passeios obviamente que se poderia, por maioria de razão relativamente à ThinGap, se dispensar tal despesa, i.e., esse custo relativo é conjuntural e desaparecerá em muitas soluções construtivas por não resultar de qualquer necessidade de suprimir a reflexão de fendas. Todavia, mesmo nas condições consideradas, a solução apresenta-se 10% mais económica que a tradicional.

iv. Por último, a solução tradicional, embora apresente o segundo preço de referência, por via do mais baixo preço da mistura (50,2 €/ton.), caminha imediatamente para o maior preço comparativo ao se ter em conta a sua menor vida útil (10 anos) acabando por ser, portanto, a solução menos vantajosa.

Nota ainda nesta comparação das quatro técnicas analisadas para que:

- As soluções de misturas betuminosas com adição de RAR, quando comparadas com as misturas convencionais, apresentarem:
  1. Preços comparativos inferiores.
  2. Possibilidade de sobreposição da camada de reforço.
  3. Custos de manutenção consideravelmente mais baixos relativamente às misturas convencionais, pois o aumento da flexibilidade da mistura irá conferir maior resistência à reflexão de fissuras.
- As soluções estudadas deverão ter um adequado comportamento estrutural nas vidas úteis adotadas que apenas não foram verificadas analiticamente na solução com betume semi-modificado.
- Sempre que possível, devem estabelecer-se comparações de preço de todas as condicionantes das técnicas de reabilitação de misturas modificadas com RAR e convencionais, pois na maioria dos casos, o peso do preço nas escolhas é sempre muito importante podendo, nalguns casos, o preço das misturas nem ser determinante.
- A produção de misturas betuminosas com RAR exigirá alguns cuidados iniciais pois um dos principais problemas com que se deparou no estudo das soluções aplicáveis à recuperação do pavimento do trecho piloto foi o da qualidade original dos agregados que apresentavam uma forma lamelar e alongada, propensos a rotura.

  Com o apoio da central de britagem formulou-se uma curva granulométrica favorecedora de maior resistência, mais descontinua que a tradicional, privilegiando o agregado de maior dimensão, mais angular e cúbico, com maior resistência e melhor desempenho à deformação permanente, o que permitiu aumentar a quantidade de ligante sem afetar a sua resistência.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estradas são, porventura, o meio que melhor permite uma circulação rápida e eficaz de pessoas e bens, revelando-se indispensáveis ao desenvolvimento de qualquer país. A modernidade exige eficiência e eficácia às redes rodoviárias que passam por garantir aos seus utentes, segurança, conforto e economia.

Nem sempre, contudo, essas garantias estão presentes nas estradas. É frequente, com o passar do tempo e sujeição às condições climatéricas, bem como por o tráfego real divergir significativamente do previsto, as vias começarem a sofrer alterações superficiais e estruturais que se agravam na presença de erros de conceção e/ou de construção ou de deficiente manutenção.

A análise do comportamento superficial e estrutural de um pavimento rodoviário permite decidir da necessidade de reabilitação em cuja equação intervém incontornavelmente o preço das soluções.

A restituição das características originais de um pavimento degradado ou a decisão por um determinado grau de "*improvement*" medido para com a situação original, atinge-se através da colocação de novos materiais. Para determinar essa nova estrutura de pavimento é necessário proceder-se a um dimensionamento, utilizando as técnicas e os materiais mais ajustados para o caso.

Estão hoje disponíveis numerosas pesquisas sobre materiais e técnicas de conservação/reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis, pretendendo ajudar a responder eficazmente às diferentes patologias dos pavimentos sendo, contudo, difícil discernir por vezes quer os ganhos comparativos das soluções quer aferir da sua viabilidade. Nos últimos anos, em Portugal, tem sido frequentemente equacionada a alternativa da adição de granulado de Borracha Reagida e Ativada (RAR) aos ligantes betuminosos algo que, do nosso conhecimento, nunca foi em profundidade estudado na Região Autónoma da Madeira.

A adição de RAR pode agora ser feita nas centrais convencionais como se tratasse de um filer dispensando os complexos processos de digestão típica das "vias húmidas" da produção anterior de BMB.

A modificação de qualquer tipo de mistura betuminosa com RAR atribuí uma série de propriedades físicas e mecânicas superiores às existentes nas misturas convencionais e mesmo às das misturas modificadas com BMB. Esse aumento nas características das misturas betuminosas traduz-se num aumento da resistência à ação do tráfego e às variações climáticas, em suma, numa maior durabilidade do pavimento.

Tendo em conta as vantagens desse aditivo, a partir de agregados típicos comummente utilizados em obras na RAM, formulou-se uma mistura betuminosa com RAR com resistência à fadiga e à deformação permanente claramente superiores aos das misturas betuminosas convencionais possibilitando a sua utilização em camadas pouco espessas, do mesmo modo que as misturas betuminosas tipo *open graded*.

A utilização de RAR em misturas betuminosas, permite, paralelamente, benefícios ambientais e económicos, proporcionando reutilização e decréscimo na quantidade de resíduos de pneus, com benefícios ambientais evidentes a que se somam menor produção de ruído na fonte e maior segurança.

Julgamos que o capítulo 4 desta dissertação evidencia que a escolha da técnica e dos materiais a utilizar na reabilitação de pavimentos, deve ousar e nem sempre acompanhar a tradição. A sociedade não se deve acomodar, mas, alargar conhecimentos e aplicá-los.

Foi nesse contexto que este trabalho foi desenvolvido, demonstrando dever haver abertura a novas técnicas e novos materiais que permitam economias e aumentos dos desempenhos dos pavimentos e da respetiva segurança, conforme se conclui do projeto de reabilitação de um pavimento rodoviário num trecho piloto situado na RAM e para o qual se preconiza uma solução estrutural com aplicação de uma mistura betuminosa designada por ThinGap com RAR, especificamente formulada. Descartou-se uma reabilitação superficial do pavimento deste trecho piloto por o trecho apresentar, sobretudo, patologia estrutural.

De notar que, no final, com a ativa colaboração da empresa construtora que facultou os inertes para o estudo da nova mistura, melhorou-se o índice de lamelação dos agregados e a percentagem de ligante ascendeu a 12%, do qual 40% é RAR, melhorando significativamente a performance da mistura.

De acordo com este estudo, a mistura betuminosa caracteriza-se da seguinte forma:

% Ligante Betuminoso		**Mistura seca**		**Curva Granulométrica**	
12 %		**Brita 4/12**	**Brita 0/4**	**Peneiros**	**% passado**
Betume 35/50	**RAR**	60 %	40 %	10,000	100,0
60 %	40 %			4,000	32,6
				2,000	20,6
				0,063	4,0

Tabela 47 – Limites globais do fuso granulométrico da mistura betuminosa ThinGap com RAR para a Madeira

Relativamente aos resultados obtidos neste estudo piloto na RAM, concluiu-se que as soluções com misturas do tipo ThinGap com RAR aplicadas em camadas de desgaste, apresentaram melhor resistência ao fendilhamento por fadiga, devido ao menor módulo de deformabilidade, sem com isso comprometer a resistência à deformação permanente, uma vez que esta tende a ser, em grande parte, assegurada pela mistura de agregados que é ligeiramente melhorada para temperaturas elevadas, dada a maior viscosidade do betume.

É de referir, que o comportamento às deformações permanentes desta mistura betuminosa, utilizando otimizadamente os mesmos inertes, é superior ao das misturas convencionais, devido:

i. ao aumento da capacidade de recuperação do betume, que a adição de RAR permite;
ii. acréscimo da viscosidade na mistura betume com RAR;
iii. melhoria na granulometria (maior percentagem de frações grossas), que a RAR permite e impõe.

Há também a referir que a nova mistura betuminosa desenvolvida nesta dissertação do tipo ThinGap, com 12% de ligante betuminoso é, até agora, uma das misturas desenvolvidas com RAR com melhores resistências à deformação permanente e à fadiga apresentando mesmo uma vida a fadiga cerca de 1000 vezes maior (vide Gráfico 9) que a vida das misturas regularmente utilizadas na RAM.

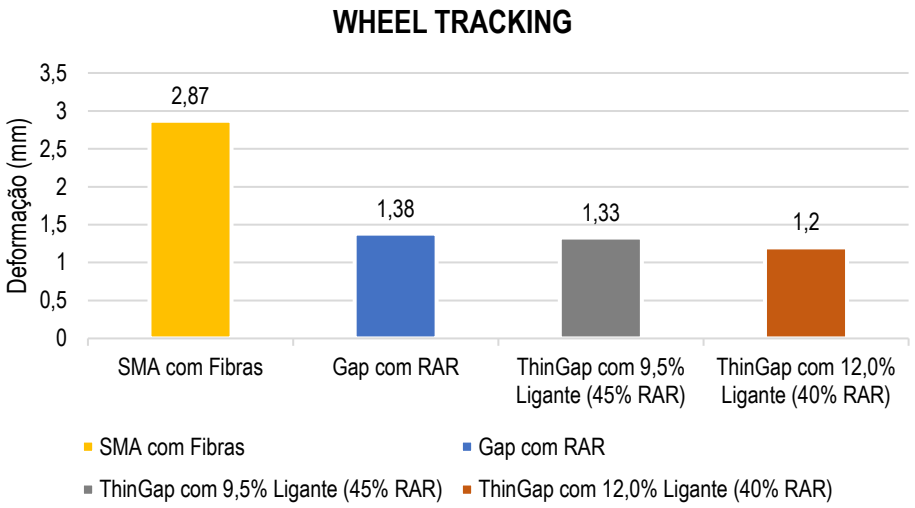


Gráfico 8 – Deformação permanente em diferentes tipos de misturas betuminosas com RAR e com fibras

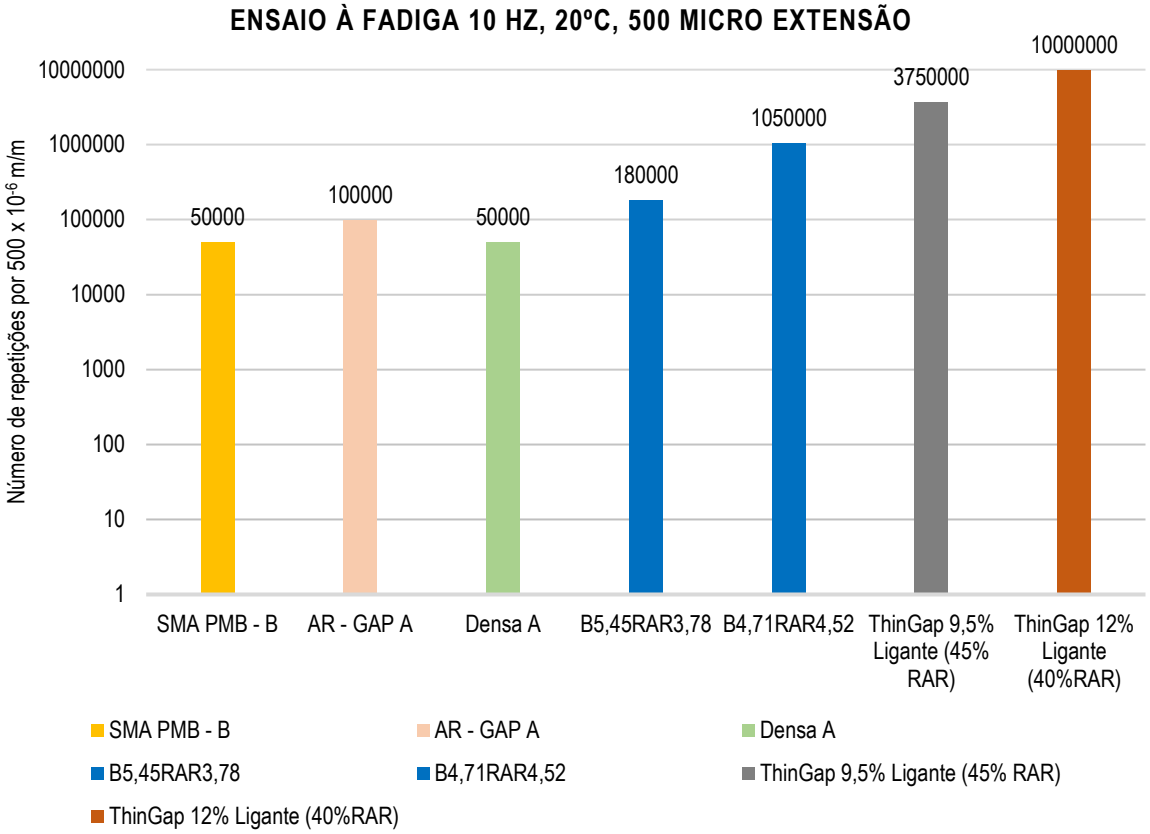


Gráfico 9 – Ensaio à fadiga em diferentes tipos de misturas betuminosas com RAR

Em suma, de acordo com estudos elaborados e experiências sobre trechos experimentais, as misturas betuminosas do tipo ThinGap com RAR têm vindo a exibir melhores resultados, em termos de características mecânicas (resistências à fadiga e deformação permanente) e funcionais (resistência à derrapagem e ruído) que misturas convencionais e misturas modificadas com BMB.

Foi elaborada uma análise das contagens disponíveis do tráfego no trecho piloto e detalhadamente analisado como o mesmo se forma estabelecendo-se interessantes correlações estatísticas com o tráfego contribuinte da VR1, principal via rodoviária da RAM e para a qual existem modelos de predição atualizados da sua evolução futura. Contudo, no caso do trecho piloto, a consideração das estimativas de tráfego futuro inferiores que essas correlações permitiam estabelecer pouco faziam variar as soluções estruturais estudadas pelo que, tudo ponderado, conservativamente, optou-se por estimar o tráfego com base nos critérios do MACOPAV.

O dimensionamento do reforço do pavimento de trecho piloto fundou-se nos resultados dos ensaios de carga com o Defletómetro de Impacto (FWD) e na informação recolhida em carotes retiradas no âmbito deste trabalho.

Dado que, sob ação dos veículos, as camadas betuminosas, que se admitem ligadas, têm um funcionamento idêntico ao de uma laje em flexão, os esforços de tração mais elevados ocorrem nas zonas inferiores das referidas camadas. Recorreu-se ao cálculo dos estados de tensão e deformação induzidos no pavimento, com auxílio a aplicação BISAR 3.0, e comparou-se ao número máximo de passagens de eixos padrão de 130 kN, para o período de dimensionamento estimado (10 anos).

Atendendo a que se estava a lidar com um reforço do pavimento a ser colocado sobre substratos já com uma longa utilização e, em muitos locais, fendilhados, a estrutura pré-existente apresentará necessariamente pouca homogeneidade, coexistindo zonas de elevada rigidez com zonas de reduzida rigidez (locais onde se situam as fendas). Daí a importância que se deu neste estudo/dimensionamento à avaliação da propagação de fendas até à superfície da nova camada betuminosa, não nos limitando à análise clássica da estrutura com base nos estados limites à fadiga e à compressão. Por outras palavras, teve-se presente e tentou-se acautelar que, com a colocação de uma nova camada betuminosa sobre uma camada fendilhada, se estará perante um funcionamento diferente do verificado em pavimentos novos.

Das quatro soluções de reabilitação estudadas concluiu-se como mais vantajosa, em termos de preço/benefício, a da aplicação de uma camada fina de reforço com uma mistura betuminosa do tipo ThinGap, com 0,03 m de espessura, sem recorrer a significativos trabalhos de fresagem.

Obter-se-á com essa solução um pavimento betuminoso que, do ponto de vista estrutural, terá previsivelmente uma excelente resistência à fadiga, retardando a reflexão de fendas, sem afetar a resistência às deformações permanentes. Do ponto de vista funcional, apresentará também excelente resistência à desagregação, à derrapagem e ao ruído. Por fim, do ponto de vista económico será não só a de menor preço inicial como a que deverá exigir menores despesas de conservação.

5.2. SUGESTÕES FUTURAS

Um trabalho de investigação é um processo dinâmico, nunca acabado. Na área da modificação de misturas betuminosas com RAR muito trabalho há para ser desenvolvido.

Salvaguardando a possibilidade de avaliações futuras, deve-se ainda notar ter-se conseguido fazer neste trabalho, para além da auscultação do pavimento do trecho piloto, a caracterização da produção de ruído pelo tráfego atual do mesmo que juntamos, para memória futura, como Anexo X.

Nesse contexto, ficamos a aguardar, com natural espectativa, não só que o Governo Regional venha a executar a reparação preconizada para o trecho piloto com misturas betuminosas modificadas com RAR como que, se tal vier a suceder, uma monitorização futura dos respetivos resultados permita interessantes conclusões, dada a profunda caracterização efetivada ao pavimento, incluindo ao nível das melhorias por atenuação do ruído.

Parecer-nos-ia também importante prosseguir na compilação de dados da contratação pública que permitam afastar qualquer dúvida de correspondência do que se estudou para com as condições de mercado e, a partir daí, evoluir na convalidação das conclusões desta dissertação, procedendo a uma mais sustentada clarificação e mensuração dos fatores que determinam os preços de pavimentações betuminosas e, dessa forma, melhor medindo as vantagens de utilização de misturas betuminosas, incluindo as com RAR.

No limite, também poderá ser interessante, estudar as dimensões mínimas de mercado, p.e., regionais, que permitam evitar importações e viabilizar soluções autónomas de produção de RAR.

Igualmente nos parece importante, em correspondência ao sucesso que as soluções alternativas de construção e reparação de pavimentos com RAR venham a ter, abrir gradativamente as condições técnicas dos “cadernos de encargos” a uma sua generalizada adoção.

A validação desta nova técnica poderá significar uma espécie de uma “mini revolução” na forma tradicional de construção e reabilitação de pavimentos betuminosos com economias de gastos e oferecer superfícies rodoviárias não só mais duradouras como com características superiores de segurança, de conforto e de respeito pelos valores ambientais.

Para além disso, julgamos que este trabalho torna evidente a conveniência e urgência da Administração Pública, nacional e regional, com o apoio das universidades, em prossecução de um interesse público, fazerem um esforço sensato de rever a “tradição” abraçando a modernidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

(JAE), J. A. (1995). *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional.* Lisboa.

AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures.* Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Airey, G. (1997). *Rheological Characteristics of Polymer Modified and Aged Bitumens.* UK: PhD Thesis, University of Nottingham.

Akbarzadeh, H., Bayat, A., & Soleymani, H. R. (2012). *Analytical Review of the HMA Temperature Correction Factors from Laboratory and Falling Weight Deflectometer Tests.* Melbourne: Chinese Society of Pavement Engineering .

Albernaz, C., Motta, L., & Medina, J. (1995). *Retroanálise: Uma Útil Ferramenta na Avaliação Estrutural de Pavimentos.* Cuiabá, Brasil: 29ª. Reunião Anual de Pavimentação. V. 1, pp. 399-417.

Alves, L. (n.d). *Centrifugação, Sifonagem e Destilação Fracionada*. Obtido de Brasil Escola: http://brasilescola.uol.com.br/quimica/centrifugacao-sifonagem-destilacao.htm

Antunes, I., Giuliani, F., & Sousa, J. B. (2008). *Caracterização Reológica de Betumes Modificados CRM sujeitos a Envelhecimento Artificial.* Lisboa: 3º Congresso Rodoviário Português.

Antunes, M., Eusébio, M., Costa, M., Domingos, P., & Lima, H. (2002). *Caracterização da mistura betuminosa com betume modificado com borracha aplicada no ICI.* Lisboa: 2.º Congresso Rodoviário Português.

Arieira, S., Maia, J., Pais, J., & Fonseca, P. (2006). *Avaliação do comportamento reológico de betume modificado com borracha de pneus usados.* Lisboa: 4º Congresso Rodoviário Português.

ASTM. (2002). *ASTM D 8: Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavemnets.* Pensilvânia, Estados Unidos: Vehicle-Pavement Systems, Annual Book of ASTM Standards.

ASTM. (2002). *Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder.*

Azevedo, M. d. (2001). *Des Niveaux de Service et des Innovations pour Repondre aux de Usagers.* Lisboa: XXII Congresso Mundial da AIPRC - Relatório Português ao Tema Estratégico TS1.

Batista, F. (2004). *Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos - Misturas Betuminosas Densas a Frio.* Porto: Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Benta, A. A., Picado-Santos, L., & Macedo, J. M. (2008). *Reabilitação de um Pavimento Flexível: Oservação do Estado Superficial, Avaliação da Capacidade Estrutural e Soluções de Reforço.* Aveiro: Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.

Bernucci, L., Motta, L., & Ceratti, J. (2008). *Pavimentação Asfáltica, Formação Básica para Engenheiros.* Rio de Janeiro: Associação Brasileiras das Empresas Distribuidoras de Asfalto.

Branco, F., Pereira, P., & Santos, L. P. (2011). *Pavimentos Rodoviários.* Coimbra: Almedina.

Brown, S., Brunton, J., & Stock, A. (1985). *The Analytical Design of Bituminous Pavements.* Londres: Proceedings of Institution of Civil Engineering, vol. 79, Part 2, pp 1-31.

Caltrans. (1992). *Asphalt Rubber Hot Mix-Gap Graded Thickness Determination Guide.* Califórnia: Division of New Technology, Materials and Research.

Caltrans. (2003). *Asphalt Rubber Usage Guide.* Bouvelard: State of California Department of Transportation.

CEEP. (2014). *14.03 - Pavimentação.* Lisboa: Caderno de Encargos da Estradas de Portugal, S.A.

Cepsa. (2006). *Manual de Pavimentação.* Barcelona: Cepsa Portuguesa Petróleos, SA.

Claessen, A., Edwards, J., Sommer, P., & Ugé, P. (1977). *Asphalt Pavement Design Manual: The Shell Method.* Michigan: Proceedings of 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements.

Colombier, G. (1997). *Cracking in pavements: nature and origin of cracks.* UK: Prevention of reflective cracking in pavements. E & FM Spon. London.

Consulpav. (2016). *ThinGap with RAR and Monitoring Pavement Condition.* Casais da Serra: Consulpav.

Consulpav, L. (2009). *Ensaios de Laboratório, Misturas Betuminosas*. Obtido de Consulpav, Consultores e projectistas de pavimentos: http://consulpav.com/home.php?pag=servicos&pag2=defle_impac

Domingos, M. D., & Faxina, A. L. (2016). *Ensaios MSCR segundo as normas ASTM D7405-10a e AASHTO.* São Paulo: Revistas Transportes, v.24, n. 3.

EN 12591. (2009). *Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens.* Bruxelas: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION.

EN 12697-34. (2004). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test.* Bruxelas: European Committee for Standardization.

EN13108-1, N. (2016). *Misturas Betuminosas — Especificações dos Materiais — Part 1: Betão Betuminoso.* Bruxelas: Jornal Oficial da União Europeia .

EP-JAE. (1995). *Manual de Dimensionamento do Reforço de Paviemntos Flexíveis.*

Estradas de Portugal. (2008). *Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários.* Almada.

Estradas, R. (2013). *Conservação e Manutenção Rodoviária.* Porto Alegre: Sociedade dos Técnicos Universitários do DAER.

FHWA, F. H. (2011). *The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure.* Washington, DC: U.S. Department of Transportation.

Fontes, L. (2009). *Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos.* Guimarães: Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho/ Universidade Federal de Santa Catarina.

Freitas, E. F., & Pereira, P. A. (2001). *Estudo da Evolução de Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis.* Guimarães: Revista engenharia Civil da Universidade do Minho, nº11.

Gardete, D., Picado-Santos, L., Pais, J., & Luzia, R. (2008). *Ensaios Laboratoriais para a caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente.* Maputo: 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia.

Henry, J., & Wambold, J. (1992). *Vehicle, Tire, Pavement Interface.* Baltimore: Library of Congress Cataloging.

Hunter, R. N. (1994). *Bituminous Mixtures in Road Construction.* London: Thomas Telford Services Ltd.

InIR. (2009). *Indicadores de Estado de Conservação de Pavimentos.* Lisboa: Instituto da mobilidade e dos transpostes, I.P.

IPMA. (2010). *Normais climatológicas, 1990-2010*. Obtido de http://www.ipma.pt

Jacinto, M. A. (2003). *Caracterização Estrutural de Pavimentos.* Porto: Dissertação para a Obtenção do Grau de Mestre em Vias de Comunicação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Jacinto, M., Ribeiro, J., & Azevedo, C. (2006). *Caracterização Estrutural de Pavimentos Rodoviários - Correlação entre a Deflexão Máxima e a Espessura de Reforço.* Recife, Brasil: Trabalho V-024, V Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias.

Kedarisetty, S., Biligiri, K. P., & Sousa, J. B. (2016). Advanced rheological characterization of Reacted and Activated Rubber (RAR) modified asphalt binders. *Elsevier*, 1-11.

Kedarisetty, S., Biligiri, K. P., & Sousa, J. B. (2016). *Advanced rheological characterization of Reacted and Activated Rubber (RAR) modified asphalt binders.* Elsevier, Volume 122. PP 12-22.

Kennedy, T., Huber, G., Harrigan, E., Cominsky, R., Hughes, C., Quintus, H., & Moulthrop, J. (1994). *Superior Performin Asphalt Pavements (Superpave):The Product of the SHRP Asphalt Research Program.* Washington, DC: Strategic Highway Research Program, National Research Council.

LNEC. (2007). *Homologação de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha.* Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

LNEC. (2013). *Ensaios para caracterização Laboratorial de Misturas Betuminosas para Paviementos Rodoviários e Aeroportuários.* Lisboa: Departamento de transportes, Núcleo de Infraestruturas de Transportes, LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Mello, L. G., Farias, M. M., Preussler, E., & Preussler, R. (2016). Análise do impacto do período de projeto de pavimentos no custo global de obras rodoviárias. *TRANSPORTES v.24*, 64-74.

Miranda, H. (2016). *Misturas Betuminosas de Alto Desempenho do Tipo Stone Mastic Asphalt - Formulação, Fabrico, Aplicação e Desempenho.* Lisboa, Portugal: Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2016.349p. Tese de Doutoramento.

Miranda, V., & Pereira, P. (1999). *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários.* Braga: Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil.

NCHRP. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilittaded Pavement Structures.* Illinois: Part 2. Design Inputs. Chaper 5. Evaluation of Existing Pavements for Rehabilitation.

Neves, J. M. (n.d.). *Betumes, Ligantes e Misturas Betuminosas.* Lisboa: DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E ARQUITECTURA – INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO .

NHI, F. /. (2000). *Superpave Fundamentals Reference Manual (NHI Course #131053).* U.S. Department Of Transportation – Federal Highway Administration.

OCDE, O. d. (1987). *Caractéristiques de Surface des Revêtements Routiers: LeurInteraction et Leur Optimisation.* Recherche en Matière des Routes et des Transports Routiers.

Oliveira, J., Pereira, P., & Santos, L. G. (1999). *Pavimentos Rodoviários: A importância da existência de um sistema de gestão.* Lisboa.

Pais, J. (1999). *Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis.* Guimarães: Tese de Doutaramento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho.

Pais, J., & Palha, C. (2010). *Resistência à Fadiga em Misturas Betuminosas para Pavimentos Rodoviários.* Minho: Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.

Pais, J., & Pereira, P. (2007). *The Improvement of Pavement Using Asphalt Rubber Hot Mixes.* Iasi.

Pais, J., Pereira, P., & Azevedo, M. d. (2010). *A Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Paviementos Flexíveis.* Lisboa: A Qualidade Rodoviária na Viragem do Século, 1º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000.

Pais, J., Pereira, P., Gardete, D., & Minhoto, M. (2008). *O comportamento de misturas betuminosas com betume modificado com borracha.* Maputo: 5º Congressp Luso-Moçambicano de Engenharia.

Pais, J., Sousa, Barreira, J., & Way, G. (2000). *An Overlay Design Method for Reflective Carcking.* Vilamoura: Asphalt Rubber 2000 Conference.

Palha, C. (2008). *Misturas Betuminosas - Agregados.* Minho: Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.

Palit, S., Reddy, K., & Pandey, B. (2004). *Laboratory evaluation of crumb rubber modified asphalt mixes.* Miami: Journal of materials in civil engineering.

Pellinem, T., Xiao, J., & Shah, A. (2008). *The effect of aging on mechanical properties of hot-mix asphalt.* Switzerland: International Society for Asphalt Pavements Symposium.

Pestana, C. C., Pereira, P. A., Pais, J. C., & Pereira, P. A. (2006). *Reabilitação de Pavimentos Utilizando Misturas Betuminosas com Betumes Modificados.* Minho: Universidade do Minho.

Picado Santos, L. (2001). *Estabelecimentos de misturas betuminosas para camadas estruturalmente importantes da formulação analitica à composição Final.* Lisboa: Jornadas de estradas e pontes dos países de Língua Portuguesa.

Picado Santos, L. (2013). *Formulação de Misturas Betuminosas.* Lisboa: Slides de apresentação da disciplina de Vias de comunicação do Mestrado Integrado em Engenharia Civil e Arquitetura do Instituto Superior Técnico.

Pinelo, A. (1993). *Programa de Investigação em Pavimentos Rodoviários.* Lisboa: Relatório para Obtenção do Título de Investigador Coordenador, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC.

Recipav. (2007). *A Utilização do Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus em Portugal.* Sines: Recipav.

Ribeiro, R. M. (2012). *APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA.* Viseu: Instituto Politécnico de Viseu. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu.

Shell. (1978). *Shell pavement design manual: asphalt pavements and overlays for road traffic.* Londres: Shell International Petroleum Company Limited.

Silva, H. (2005). *Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique, Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas.* Minho: Dissertação de Doutoramento , Escola de Engenharia, Universidade do Minho.

Silva, J. (2007). A incorporação de Borracha de Pneus Inversíveis em Revestimentos Asfálticos de Pavimentos Rodoviários e Urbanos. *Revista Espaço Sophia N.º 9*.

Sousa, J. B., & Silva, F. (2012). *Development Studies Study of RuBind Stage 5 - PG Grade Evaluation TA and TA2 Rubind Formulations.* Casais da Serra: Consulpav.

Sousa, J. B., Miranda, H., & Silva, F. (2012). *Development of new asphalt mixture ThinGap 9.5 mm with Reacted and Activated Rubber.* Casais da Serra: Consulpav.

Sousa, J. B., Pais, J., Saim, R., & Way, G. (2002). *Método de Dimensionamento de Reforços para Controlar a Reflexão de Fendas.* Lisboa: 2.º Congresso Rodoviário Português-Estradas 2002.

Sousa, J. B., Vorobiev, A., Ishai, I., Svechinsky, G., & Sousa, R. (2012). *Elastomeric Asphalt Extender - A New Frontier on Asphalt Rubber Mixes.* Casais da Serra: CONSULPAV.

Sousa, J., Craus, J., & Monismith, C. (1991). *Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete.* Washington, D.C.: SHRP-A/IR-91-103, Strategic Highway Research Program. National Research Council.

Sousa, J., Fonseca, P., Freire, A., & Pais, J. (1999). *Comparação da vida à fadiga e deformação permanente entre misturas com betume modificado com borracha reciclada de pneus e convencionais.* Sevilha: 10º Congresso Ibero-Latinoamericado del Asfalto.

Suprimentos, M. (n.d de n.d de n.d). *O que é o betume?* Obtido de Portal Matálica: http://wwwo.metalica.com.br/o-que-e-betume

Teng, T. P. (2003). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement.* Virginia, EUA: Federal Highway Administration.

The Asphalt Institute. (1971). *Asphalt Tecnhology and Construction.* Maryland, USA: Instructor´s Guide.

Ullidtz, P., & Peattie, K. (1982). *Programmable Calculators in the Assessment of Overlays and Maintenance Strategies.* South Holland.

Valorpneu. (2015). *Relatório Anual & Contas 2015.*

Venudharan, V., Biligiri, K. P., Sousa, J. B., & B., W. G. (2016). *Asphalt-rubber gap-graded mixture design practies: a state-of-the-art research review and future perspective.*

ANEXOS

ANEXO I
CARACTERIZAÇÃO BETUME COMBINADO

AI.1. Propriedades do Betume

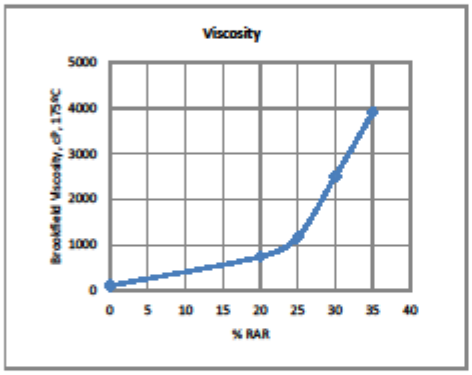
Laboratório consulpav

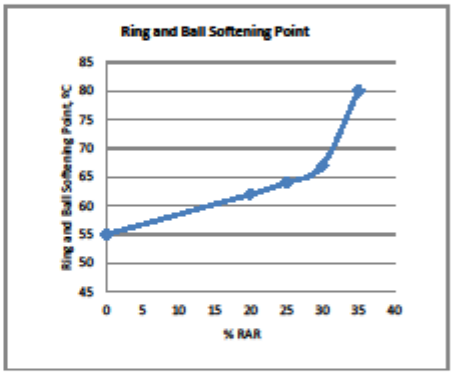
Resumo dos Resultados dos Ensaios

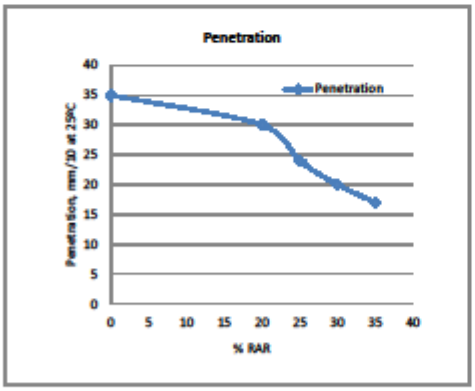
VISCOSITY DETERMINATIONS OF UNFILLED ASPHALTS - Brookfield Thermosel Apparatus - AASHTO TP 48
BITUMEN SOFTENING POINT RING AND BALL METHOD - ASTM D 36
BITUMEN PENETRATION TESTING - ASTM D 5 - 97
BITUMEN RESILIENCE TESTING - ASTM D 5329 - 96

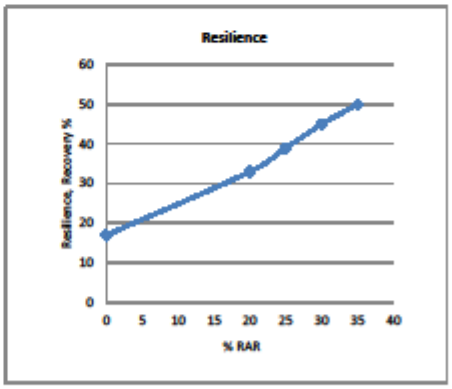
Client: Duarte Manica
Project:
Sample Description: Repsol 35/50 **Project:**

Bitumen	% RAR	Viscosity	Ring and Ball	Penetration	Resilience
35/50	0	118	55	35	17
	20	750	62	30	33
	25	1175	64	24	39
	30	2500	67	20	45
	35	3900	80	17	50









Laboratory Technician: *Michelle Fernandes*
Date: Mar-17

Laboratory Director: *Douwe Eng. Jorge R. Sousa*

All the results, opinions or interpretations are based exclusively on tested samples. Consulpav does not assume any responsibility for the use of the bulletin for any other purposes. This report is for exclusive use of the customer and it can't be reproduced, without Consulpav's previous authorization

AI.2. Grau PG de um betume combinado – "*Performance Grade*"

Propriedades		Betume 35/50				
		Aditivo, RAR (%)				
		0	20	25	30	35
Grau PG		70-22	94-16	100-10	106-10	118-10
Grau PG Contínuo		75.9–22.2 (24.2)	97.6–16.8 (21.1)	104.7–12.8 (19.2)	109.8–14.8 (17.6)	121.7–13.7 (16.2)
Viscosidade rotacional (cP, 135 °C)		627,5	4225	8862	n.a.	n.a.
Reómetro de Corte Dinâmico	**Temp. Pass (°C)**	**70**	**82**	**88**	**100**	**112**
	Ângulo de fase (°)	83,56	80,37	79,68	75,88	63,62
	G*/sin delta (10 rad/sec., kPa)	1,332	1,443	1,391	1,055	1,744
	Temp. Fail (°C)	**76**	**88**	**94**	**106**	**n.a.**
	Ângulo de fase (°)	85,3	81,46	80,5	75,51	n.a.
	G*/sin delta (10 rad/sec., kPa)	0,656	0,86	0,915	0,849	n.a.
	Pass/Fail Temp. (°C)	**72,4**	**86,3**	**92,7**	**101,5**	**n.a.**

Tabela 48 – Resumo Grau PG do betume combinado estudado

EREFA(RFTO): Estufa Rotativa para o Envelh. Asfáltico		Betume 35/50				
		Aditivo, RAR (%)				
		0	20	25	30	35
Massa perdida (%)		0,01	0,02	0,03	0,03	0,03
Reómetro de Corte Dinâmico	**Temp. Pass (°C)**	**70**	**94**	**100**	**106**	**118**
	Ângulo de fase (°)	76,24	68,98	67,4	66,04	61,32
	G*/sin delta (10 rad/sec., kPa)	4,580	2,985	3	2,873	2,659
	Temp. Fail (°C)	**76**	**100**	**106**	**112**	**124**
	Ângulo de fase (°)	79,1	71,69	70,03	67,69	61,08
	G*/sin delta (10 rad/sec., kPa)	2,181	1,797	1,992	1,892	1,962
	Pass/Fail Temp. (°C)	**75,9**	**97,6**	**104,7**	**109,8**	**121,7**

Tabela 49 - Resultados do Grau PG segundo a EREFA (RFTO)

CEP (PAV): Camâra de Envelhecimento Pressuaziva		Betume 35/50				
		Aditivo, RAR (%)				
		0	20	25	30	35
Reómetro de Corte Dinâmico	**Temp. Pass (°C)**	**25**	**22**	**22**	**19**	**19**
	Ângulo de fase (°)	40,62	33,95	32,81	31,97	31,77
	G*/sin delta (10 rad/sec., kPa)	4500	4613	4026	4381	3969
	Temp. Fail (°C)	**22**	**19**	**19**	**16**	**16**
	Ângulo de fase (°)	37,9	32,01	32,28	31,28	30,00
	G*/sin delta (10 rad/sec., kPa)	6694	6039	5059	5821	5071
	Temp. Pass (°C)	**-12**	**-6**	**0**	**0**	**0**
Reómetro de Flexão Estática	s (60 s, MPa)	158	56	23	25	16
	M-valor (60 s)	0,302	0,305	0,315	0,320	0,318
	Temp. Fail (°C)	**-18**	**-12**	**-6**	**-6**	**-6**
	s (60 s, MPa)	357	84	62	47	47
	M-valor (60 s)	0,252	0,268	0,284	0,295	0,289

Tabela 50 - Resultados do Grau PG segundo CEP (PAV)

MSCR	Betume 35/50				
	Aditivo, RAR (%)				
	0	20	25	30	35
Média de Recuperação (0.1 kPa, %)	23,5	78,1	83,3	86,7	89,0
Média de Recuperação (3.2 kPa, %)	14,1	64,3	74,2	82,8	86,7
Diferença entre a % média de 0.1 kPa e de 3.2 kPa (%)	40,41	17,66	10,92	4,51	2,54
Jnr (0.1 kPa)	0,600	0,027	0,015	0,008	0,005
Jnr (3.2 kPa)	0,705	0,045	0,023	0,010	0,006
Diferença entre o Jnr de 0.1 kPa e de 3.2 kPa (%)	17,20	66,15	56,75	32,35	21,05

Tabela 51 - Resultados do ensaios MSCR

Performance Grade	PG 46			PG 52						PG 58						PG 64						PG 70						PG 76						PG 82					
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Average 7-day Max Pavement Design Temperature, °C	< 46			< 52						< 58						< 64						< 70						< 76						< 82					
Min Pavement Design Temperature, °C	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40
ORIGINAL BINDER																																							
Flash Point Temp, T48, Min °C	230																																						
Viscosity, ASTM D 4402: Max 3 Pa's, Test Temp, °C	135																																						
Dynamic Shear, TP 5 Min. 1Kpa G*/sin8 Test Temp @ 10 rad/s, °C	46			52						58						64						70						76						82					
ROLLING THIN FILM OVEN RESIDUE (T 240)																																							
Mass loss, Max, percent	1,00																																						
Dynamic Shear, TP 5 Min. 2.20 Kpa G*/sin8 Test Temp @ 10 rad/s, °C	46			52						58						64						70						76						82					
PRESSURE AGING VESSEL RESIDUE (PP 1)																																							
PAV Aging Temperature °C	90			90						100						100						100 (110)						100 (110)						100 (110)					
Dynamic Shear, TP 5 Min. 5000 Kpa G*/sin8 Test Temp @ 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28	25	22
Physical Hardening	Report																																						
Creep Stiffness, TP 1 Determine the critical cracking temperature as described in PP 42	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36
Direct Tension, TP 3 Determine the critical cracking temperature as described in PP 42	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36

S

Tabela 52 – "*Performance Grade*" - Grau PG para betumes convencionais

ANEXO II

CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

AII.1. Granulometrias dos agregados utilizados na mistura ThinGap com RAR

Laboratório consulpav

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS
(Especificação EN 933-1)

Cliente: Engº Duarte Manica
Título da Obra: Duarte Tese
Descrição da Amostra: Brita 0_4 — **Origem:** Madeira
Amostra nº: A17058 — **Projecto:** Est06_13

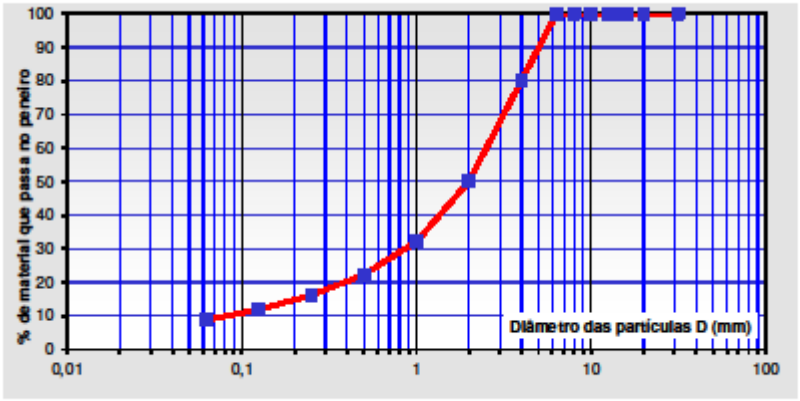
Massa inicial da amostra seca	M1 =	1179,9
Massa da amostra seca após lavagem	M2 =	1102,4
Perca dos "finos" na lavagem	Mp =	77,5

PROCEDIMENTO: [X] LAVAGEM E PENEIRAÇÃO [ ] PENEIRAÇÃO A SECO
SÉRIE DE PENEIRO USADA: SÉRIE BASE + SÉRIE 2

Peneiração da fracção

Abertura da malha (mm)	Massa retida Mx (g)	% retida $\frac{M_x}{M_{tot}} \times 100$	Percentagem acumulada do material retido	Percentagem acumulada do material que passa
31,5	0,0			**100,0**
20,0	0,0			**100,0**
16,0	0,0	0,0	0,0	**100,0**
14,0	0,0	0,0	0,0	**100,0**
12,5	0,0	0,0	0,0	**100,0**
10,0	0,0	0,0	0,0	**100,0**
8,0	0,0	0,0	0,0	**100,0**
6,3	1,9	0,2	0,2	**99,8**
4,0	231,6	19,6	19,8	**80,2**
2,0	354,4	30,0	49,8	**50,2**
1,0	213,00	18,1	67,9	**32,1**
0,500	115,80	9,8	77,7	**22,3**
0,250	72,30	6,1	83,8	**16,2**
0,125	49,70	4,2	88,0	**12,0**
0,063	36,90	3,1	91,2	**8,8**
Retido no fundo R =	19,90	1,7	92,8	**7,2**
Total < nº200 (R+Mp) =	**97,40**	8,3		

$\sum Mx =$ 1096
Erro (%)= 0,63 %



Observações:

Técnico Laboratório: *Pedro Nobre*
Data de execução: 11-07-2017

Responsável Laboratório:
Doutor Engº Jorge Sousa

Os resultados, opiniões ou interpretações são baseados apenas nas amostras ensaiadas. A Consulpav não assume qualquer responsabilidade pelo uso do boletim para outros fins. Este relatório de ensaio é para uso exclusivo do cliente, não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização prévia da Consulpav.

Modelo LAB_008B/4/09.2005

Laboratório consulpav

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS
(Especificação EN 933-1)

Cliente: Engº Duarte Manica
Título da Obra: Duarte Tese
Descrição da Amostra: Brita 4_12 — **Origem:** Madeira
Amostra nº: AI7 057 — **Projecto:** Est06_13

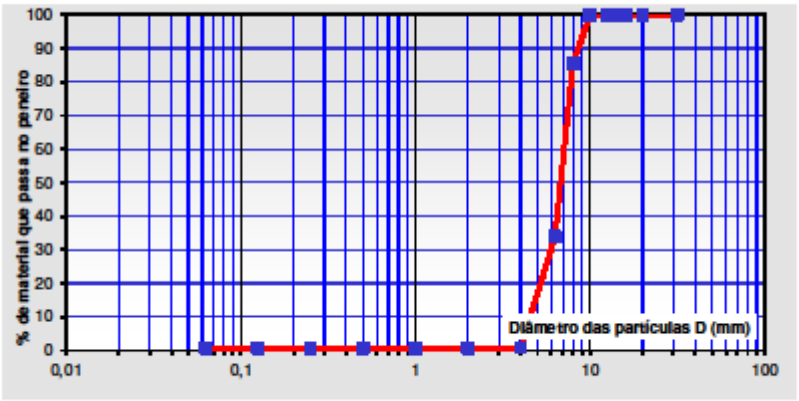
Massa inicial da amostra seca	M1 =	2053,0
Massa da amostra seca após lavagem	M2 =	2040,0
Perca dos "finos" na lavagem	Mp =	13,0

PROCEDIMENTO: [X] LAVAGEM E PENEIRAÇÃO [ ] PENEIRAÇÃO A SECO
SÉRIE DE PENEIRO USADA: SÉRIE BASE + SÉRIE 2

Peneiração da fracção

Abertura da malha (mm)	Massa retida Mx (g)	% retida $\frac{M_x}{M_{tot}} \times 100$	Percentagem acumulada do material retido	Percentagem acumulada do material que passa
31,5	0,0			100,0
20,0	0,0			100,0
16,0	0,0	0,0	0,0	100,0
14,0	0,0	0,0	0,0	100,0
12,5	0,0	0,0	0,0	100,0
10,0	0,0	0,0	0,0	100,0
8,0	298,6	14,5	14,5	85,5
6,3	1059,4	51,6	66,1	33,9
4,0	676,8	33,0	99,1	0,9
2,0	1,8	0,1	99,2	0,8
1,0	0,30	0,0	99,2	0,8
0,500	0,20	0,0	99,2	0,8
0,250	0,20	0,0	99,2	0,8
0,125	0,30	0,0	99,2	0,8
0,063	0,80	0,0	99,3	0,7
Retido no fundo R =	0,80	0,0	99,3	0,7
Total < nº200 (R+Mp) =	13,80	0,7		

$\sum Mx =$ 2039
Erro (%)= 0,04 %



Observações:

Técnico Laboratório: *Pedro Nobre*
Data de execução: 11-07-2017

Responsável Laboratório:
Doutor Engº Jorge Sousa

Os resultados, opiniões ou interpretações são baseados apenas nas amostras ensaiadas. A Consulpav não assume qualquer responsabilidade pelo uso do boletim para outros fins. Este relatório de ensaio é para uso exclusivo do cliente, não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização prévia da Consulpav.

Modelo LAB_008B/4/09.2005

Laboratório consulpav

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS
(Especificação EN 933-1)

Cliente: Engº Duarte Manica
Título da Obra: Duarte Tese
Descrição da Amostra: Brita 10_20 — **Origem:** Madeira
Amostra nº: AT7059 — **Projecto:** Est06_13

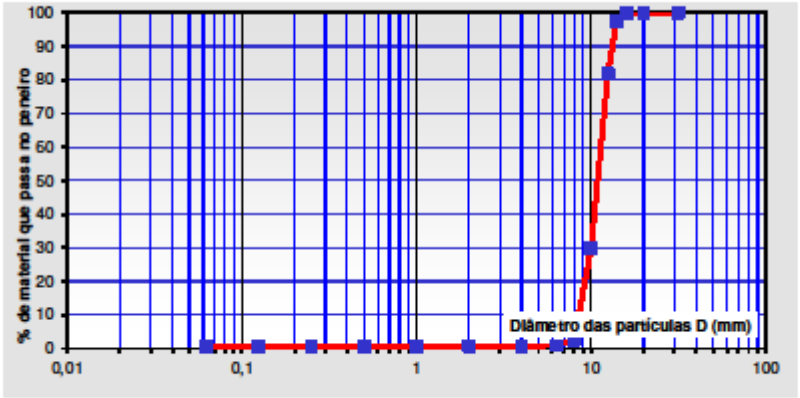
Massa inicial da amostra seca	M1 =	2315,7
Massa da amostra seca após lavagem	M2 =	2302,0
Perca dos "finos" na lavagem	Mp =	13,7

PROCEDIMENTO: [X] LAVAGEM E PENEIRAÇÃO [ ] PENEIRAÇÃO A SECO
SÉRIE DE PENEIRO USADA: SÉRIE BASE + SÉRIE 2

Peneiração da fracção

Abertura da malha (mm)	Massa retida Mx (g)	% retida $\frac{M_x}{M_{tot}} \times 100$	Percentagem acumulada do material retido	Percentagem acumulada do material que passa
31,5	0,0			100,0
20,0	0,0			100,0
16,0	0,0	0,0	0,0	100,0
14,0	56,7	2,4	2,4	97,6
12,5	364,9	15,8	18,2	81,8
10,0	1204,1	52,0	70,2	29,8
8,0	629,7	27,2	97,4	2,6
6,3	39,0	1,7	99,1	0,9
4,0	3,5	0,2	99,2	0,8
2,0	0,8	0,0	99,3	0,7
1,0	0,20	0,0	99,3	0,7
0,500	0,30	0,0	99,3	0,7
0,250	0,30	0,0	99,3	0,7
0,125	0,70	0,0	99,3	0,7
0,063	1,10	0,0	99,4	0,6
Retido no fundo R =	1,30	0,1	99,4	0,6
Total < nº200 (R+Mp) =	15,00	0,6		

$\sum Mx =$ 2303
Erro (%)= -0,03 %



Observações:

Técnico Laboratório: *Pedro Nobre*
Data de execução: 11-07-2017

Responsável Laboratório:
Doutor Engº Jorge Sousa

Os resultados, opiniões ou interpretações são baseados apenas nas amostras ensaiadas. A Consulpav não assume qualquer responsabilidade pelo uso do boletim para outros fins. Este relatório de ensaio é para uso exclusivo do cliente, não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização prévia da Consulpav.

Modelo LAB_008B/4/09.2005

AII.2. Absorção de água dos agregados utilizados na mistura ThinGap com RAR

Laboratório consulpav

MASSAS VOLÚMICAS
ABSORÇÃO DE ÁGUA DE BRITAS E GODOS
(Especificação NP 581-1969)

Cliente: *Engº Duarte Manica*
Título da Obra: Duarte Tese
Descrição da Amostra: Brita 10_20
Amostra nº: *A17059* **Data de recepção:** *03-07-2017* **Projecto:** *EST06_13*

ENSAIO Nº			1
PESO NO AR DA AMOSTRA SATURADA COM SUPERFÍCIE	M_1 (g)		2240,60
PESO NA ÁGUA DA AMOSTRA SATURADA	M_2 (g)		1471,80
PESO NO AR DA AMOSTRA SECA	M_3 (g)		2200,50
MASSA VOLÚMICA DA ÁGUA Á TEMPERATURA DO ENSAIO	γ_w= 1000		1,00049
TEMPERATURA DO ENSAIO	ºC		23,4
MASSA VOL.DO MAT IMPER.DAS PARTÍCULAS	$((M_3 / (M_3-M_2)) (\gamma w)$	(kg/m^3)	3,02
MASSA VOL. DAS PARTIC.SATUR.COMSUPERFÍCIE SECA	$((M_1 / (M_1-M_2)) (\gamma w)$	(kg/m^3)	2,92
MASSA VOLÚMICA DAS PARTÍCULAS SECAS	$((M_3 / (M_1-M_2)) (\gamma w)$	(kg/m_3)	2,86
ABSORÇÃO DE ÁGUA	$((M_1-M_3) / M_3)) (100)$	(0,1%)	1,8

Observações:

Técnico Laboratório: *Pedro Nobre*
Data de execução: 05-07-2017

Responsável Laboratório: *Engº Jorge Sousa*

Os resultados, opiniões ou interpretações são baseados apenas nas amostras ensaiadas. A Consulpav não assume qualquer responsabilidade pelo uso do boletim para outros fins. Este relatório de ensaio é para uso exclusivo do cliente, não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização prévia da Consulpav.

Modelo LAB_027/2/09.2005

AII.3. Massa volúmica dos agregados utilizados na mistura ThinGap com RAR

Laboratório consulpav

DENSIDADE DAS PARTÍCULAS
MÉTODO DO PICNÓMETRO (MATERIAL PASSADO NO PENEIRO Nº4)
(Especificação NP 83-1965)

Cliente: *Engº Duarte Manica*
Título da Obra: Duarte Tese
Descrição da Amostra: Brita 0_4
Amostra nº: *A17058* **Data de recepção:** *03-07-2017* **Projecto:** *Est06_13*

ENSAIO Nº			1	2
NUMERO DO PICNÓMETRO			38	59
PESO DO PICNÓMETRO CHEIO DE ÁGUA	M_3	(g)	148,00	148,50
PESO DO PROVETE SECO	M_4	(g)	84,89	86,30
PESO DO (PICNÓMETRO+PROVETE+ÁGUA)	M_5	(g)	204,64	206,10
TEMPERATURA DO ENSAIO		°C	22,2	22,1
COEFICIENTE DE CORRECÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA	K		1,00073	1,00073
DENSIDADE DAS PARTÍCULAS	$G=(M_4/(M_3-(M_5-M_4))*K$		3,01	3,02
G= MÉDIA DAS DENSIDADES DAS PARTÍCULAS			3,02	
MASSA VOLÚMICA	$\gamma_i=(G \times \gamma_w)$	(g/cm^3)	3,017	

Observações:

Técnico Laboratório: *Pedro Nobre*
Data de execução: 06-07-2017

Responsável Laboratório: *Engª Jorge Sousa*
07-07-2017

Os resultados, opiniões ou interpretações são baseados apenas nas amostras ensaiadas. A Consulpav não assume qualquer responsabilidade pelo uso do boletim para outros fins. Este relatório de ensaio é para uso exclusivo do cliente, não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização prévia da Consulpav.

Modelo LAB_023/2/09.2005

Laboratório consulpav

DENSIDADE DAS PARTÍCULAS
MÉTODO DO PICNÓMETRO (MATERIAL PASSADO NO PENEIRO Nº4)
(Especificação NP 83-1965)

Cliente: *Engº Duarte Manica*
Título da Obra: Duarte Tese
Descrição da Amostra: Brita 4_12
Amostra nº: *A17057* **Data de recepção:** *03-07-2017* **Projecto:** *Est06_13*

ENSAIO Nº			1	2
NUMERO DO PICNÓMETRO			1	2
PESO DO PICNÓMETRO CHEIO DE ÁGUA	M_3	(g)	1321,50	1322,60
PESO DO PROVETE SECO	M_4	(g)	843,60	773,10
PESO DO (PICNÓMETRO+PROVETE+ÁGUA)	M_5	(g)	1884,60	1839,10
TEMPERATURA DO ENSAIO		ºC	23,00	23,00
COEFICIENTE DE CORRECÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA	K		1,00049	1,00049
DENSIDADE DAS PARTÍCULAS	$G=(M_4/(M_3-(M_5-M_4))*K$		3,01	3,02
G= MÉDIA DAS DENSIDADES DAS PARTÍCULAS			3,02	
MASSA VOLÚMICA	$\gamma_t=(G \times \gamma_w)$	(g/cm^3)	3,018	

Observações:

Técnico Laboratório: *Pedro Nobre*
Data de execução: 06-07-2017

Responsável Laboratório: *Engª Jorge Sousa*
07-07-2017

Os resultados, opiniões ou interpretações são baseados apenas nas amostras ensaiadas. A Consulpav não assume qualquer responsabilidade pelo uso do boletim para outros fins. Este relatório de ensaio é para uso exclusivo do cliente, não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização prévia da Consulpav.

Modelo LAB_023/2/09.2005

ANEXO III

CARACTERIZAÇÃO DA THINGAP

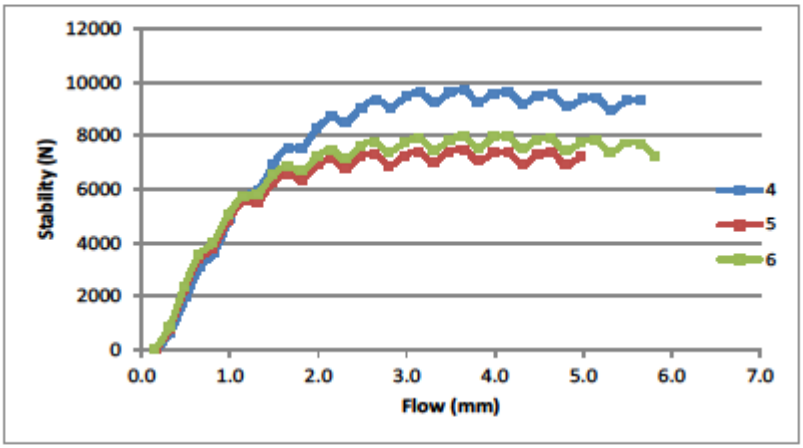
AIII.1. Boletim de Marshall da nova formulação de mistura ThinGap com RAR

Laboratório consulpav

RESISTANCE TO DEFORMATION AND COHESION OF BITUMINOUS MIXTURES
(ASTM - D 1559-76)

Client:	Duarte Manica	**Mix Type:**	ThinGAP
Project Name:	Tese		###
Project No.:	Est06_13		11% Asphalt

			Sample Number →	4	5	6
Sample Specific Gravity at 25° C	ASTM D 2726-96	(g/cm^3)		2.380	2.375	2.336
				2.363		
Specific Bituminous Mixture Gravity at 25° C	ASTM D 2041-95	(g/cm^3)		2.544		
Sample Porosity (Void %)	$V_V = [1-Bsp/BMT)\times100$	(%)		6.5	6.7	8.2
				7.1		
Percent of Asphalt	(ASTM D 6307)	(%)		11.0		
Aggregate Density	Ga*	(g/cm^3)		3.109		
Volumetric Bitumen Percentage	Vb = (Pb×Bsp) / 1.03	(%)		23.4	23.3	22.9
Aggregate Mixture Voids	$VMA = V_B + V_V$	(%)		29.8	30.0	31.1
				30.3		
Bitumen Saturation Degree	$VFB = V_V / VMA$	(%)		78	78	74
				76.6		
Uncorrected Marshall Stability	F_R	(N)		9,483	7,459	8,128
Sample Average Height	H	(mm)		62	63	64
Correction Factor for the Marshall Stability	K	/		1.03	1.00	0.98
Corrected Marshall Stability	F_{RC}	(N)		9,723	7,477	7,976
Average Marshall Stability	$F_{RC\text{-}average}$	(N)		8,392		
Flow ("stability")	δ_R	(mm)		3.5	3.5	4.0
Average Flow	$\delta_{R\text{-}average}$	(mm)		3.7		



Laboratory Technician: *Francisco Silva e Pedro Nobre*
Date: 8/4/2017

Laboratory Director: Doutor Eng.º Jorge Sousa

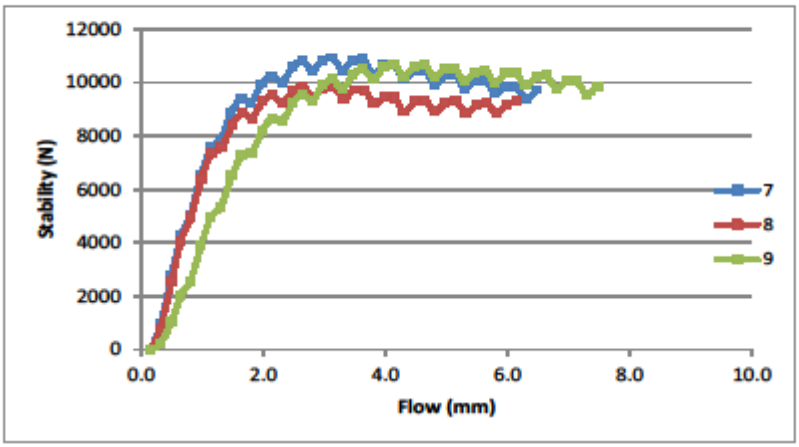
All the results, opinions or interpretations are based exclusively on tested samples. Consulpav does not assume any responsibility for the use of the bulletin for any other purposes. This report is for exclusive use of the customer and it can't be reproduced, without Consulpav's previous authorization.

Laboratório consulpav

RESISTANCE TO DEFORMATION AND COHESION OF BITUMINOUS MIXTURES (ASTM - D 1559-76)

Client:	Duarte Manica	**Mix Type:**	ThinGAP
Project Name:	Tese		###
Project No.:	Est06_13		12% Asphalt

			Sample Number →	7	8	9
Sample Specific Gravity at 25° C	ASTM D 2726-96	(g/cm^3)		2.388	2.365	2.385
				2.379		
Specific Bituminous Mixture Gravity at 25° C	ASTM D 2041-95	(g/cm^3)		2.515		
Sample Porosity (Void %)	$V_V = [1-Bsp/BMT)\times100$	(%)		5.0	6.0	5.2
				5.4		
Percent of Asphalt	(ASTM D 6307)	(%)		12.0		
Aggregate Density	Ga*	(g/cm^3)		3.130		
Volumetric Bitumen Percentage	Vb = (Pb×Bsp) / 1.03	(%)		25.3	25.0	25.3
Aggregate Mixture Voids	$VMA = V_B + V_V$	(%)		30.3	31.0	30.4
				30.6		
Bitumen Saturation Degree	$VFB = V_V / VMA$	(%)		83	81	83
				82.4		
Uncorrected Marshall Stability	F_R	(N)		10,416	9,618	10,417
Sample Average Height	H	(mm)		61	62	62
Correction Factor for the Marshall Stability	K	/		1.05	1.03	1.03
Corrected Marshall Stability	F_{RC}	(N)		10,937	9,861	10,680
Average Marshall Stability	$F_{RC\text{-}average}$	(N)		10,493		
Flow ("stability")	δ_R	(mm)		3.0	2.5	4.0
Average Flow	$\delta_{R\text{-}average}$	(mm)		3.1		



Laboratory Technician: *Francisco Silva*
Date: 8/4/2017

Laboratory Director: Doutor Eng.º Jorge Sousa

All the results, opinions or interpretations are based exclusively on tested samples. Consulpav does not assume any responsibility for the use of the bulletin for any other purposes. This report is for exclusive use of the customer and it can't be reproduced, without Consulpav's previous authorization.

AIII.2. Boletim i-Mix para a primeira formulação da mistura ThinGap com RAR

i-MIX DESIGN

Client	*Duarte Tese de mestrado*							*Date*
Project	*N.º*	*H04_17*						
	Description	*MBR com RAR*						
	Location	*Madeira*						

Asphalt mixture Information								
Mixture Type	SMA	SMA	*Maximum particle dimension (mm)*				14	
Application type	Surface course	Surf	*Mixture designation*			*SMA 14 Surf 50/70*		

Material		*Trial Asphalt Mixtures*						
		Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5	Mix 6	Mix 7
Fractions d/D (mm)	4/12	70,0						
	0/4	30,0						
	0/1	0,0						
	10/20	0,0						
Bitumen	*% to asphalt mixture*	7,0	7,5	8,0				
	% to bitumen	65,0	65,0	65,0				
Additive	*% to asphalt mixture*							
	% to bitumen	35,0	35,0	35,0				

Property	*Mix design criteria*	*Volumetric Properties Predicted*						
Bitumen (%)	6,0 - 7,5	**7,0**	**7,5**	**8,0**				
Air voids (%)	2,5 - 4,0	4,3	3,0	1,8				
VMA (%)	17,0 -	20,2	20,1	20,2				
VFB (%)	70,0 - 90,0	78,9	85,4	91,2				
Film Thickness (microns)	10,0 - 15,0	12,5	13,4	14,0				
Film Thickness (microns)	10,0 - 15,0	16,9	18,1	19,3				

Property	*Mix design criteria*	*Predicted Performance (Water sensitivity)*						
Water sensitivity - ITSR (%)	75 -	109	109	109				

Property	*Mix design criteria*	*Predicted Performance (Permanent deformation resistance)*						
Maximum ruth depth - Rdair (mm)	0,0 - 3,0	2,3 - 2,5	2,7 - 3,4	4,5 - 7,5				
Maximum wheel tracking slope - WTSair (%)	0,00 - 0,10	0,06 - 0,06	0,07 - 0,1	0,13 - 0,21				
Maximum proportional ruth depth - PRDair (%)	0,0 - 6,0	4,7 - 4,9	5,3 - 6,8	8,9 - 15,1				

Property	*Mix design criteria*	*Predicted Performance (Fatigue resistance)*						
Mixture Modulus (MPa)	1500 - 5000	1398 - 1532	1215 - 1334	1029 - 1140				
$N\varepsilon_6$	300 -	680 - 749	787 - 869	929 - 1036				

Property	*Mix design criteria*	*Predicted Performance (Surface properties)*						
Macrotexture (mm)	0,8 -	0,8	0,8	0,8				
Friction Resistance (BPN)	50 -	61,7	61,7	61,7				

Page 1/1

AIII.3. Boletim i-Mix para a nova formulação da mistura ThinGap com RAR

i-MIX DESIGN

Client	*Duarte Tese de mestrado*		*Date*
Project	*N.º*	*H04_17*	18.07.2017
	Description	*MBR com RAR*	
	Location	*Madeira*	

Asphalt mixture Information				
Mixture Type	ThinGap	TG	*Maximum particle dimension (mm)*	12,5
Application type	Surface course	Surf	*Mixture designation*	*TG 12,5 Surf 50/70*

Material		*Trial Asphalt Mixtures*						
		Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5	Mix 6	Mix 7
Fractions d/D (mm)	4/12	60,0						
	0/4	40,0						
	0/1	0,0						
	10/20	0,0						
Bitumen	*% to asphalt mixture*	7,5	9,0	10,0	11,0	12,0		
	% to bitumen	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0		
Additive	*% to asphalt mixture*							
	% to bitumen	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0		

Property	*Mix design criteria*	*Volumetric Properties Predicted*						
Bitumen (%)	6,0 - 7,5	**7,5**	**9,0**	**10,0**	**11,0**	**12,0**		
Air voids (%)	2,5 - 4,0	13,0	9,5	7,6	5,8	3,9		
VMA (%)	17,0 -	28,5	28,5	28,9	29,3	29,7		
VFB (%)	70,0 - 90,0	54,6	66,8	73,6	80,3	86,8		
Film Thickness (microns)	10,0 - 15,0	14,3	17,1	19,0	20,9	22,8		

Property	*Mix design criteria*	*Predicted Performance (Water sensitivity)*						
Water sensitivity - ITSR (%)	75 -	116	116	116	116	116		

Property	*Mix design criteria*	*Predicted Performance (Permanent deformation resistance)*						
Maximum ruth depth - Rdair (mm)	0,0 - 3,0	2,8 - 2,8	2,6 - 2,5	2,4 - 2,4	2,4 - 2,4	2,9 - 3,4		
Maximum wheel tracking slope - WTSair (%)	0,00 - 0,10	0,06 - 0,06	0,05 - 0,05	0,05 - 0,05	0,06 - 0,06	0,08 - 0,1		
Maximum proportional ruth depth - PRDair (%)	0,0 - 6,0	6,0	5,3 - 5,2	4,9 - 4,8	4,7 - 4,8	5,8 - 6,8		

Property	*Mix design criteria*	*Predicted Performance (Fatigue resistance)*						
Mixture Modulus (MPa)	1500 - 5000	2195 - 3311	1828 - 2810	1625 - 2524	1425 - 2236	1216 - 1925		
N_{ε_6}	300 -	465	564	639	734	868		

Property	*Mix design criteria*	*Predicted Performance (Surface properties)*						
Macrotexture (mm)	0,8 -	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5		
Friction Resistance (BPN)	50 -	59,2	59,2	59,2	59,2	59,2		

Page 1/1

i-MIX DESIGN

Client	Duarte Tese de mestrado (novos materiais britados com 40% de RAR)		Date
Project	N.º	H04_17	18.07.2017
	Description	MBR com RAR	
	Location	Madeira	

Asphalt mixture Information					
Mixture Type	SMA	SMA	Maximum particle dimension (mm)		12,5
Application type	Surface course	Surf	Mixture designation	SMA 12,5 Surf 50/70	

Material		Trial Asphalt Mixtures						
		Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5	Mix 6	Mix 7
Fractions d/D (mm)	4/12	60,0						
	0/4	40,0						
	0/1	0,0						
	10/20	0,0						
Bitumen	% to asphalt mixture	11,0	11,5	12,0	12,5			
	% to bitumen	60,0	60,0	60,0	60,0			
Additive	% to asphalt mixture							
	% to bitumen	40,0	40,0	40,0	40,0			

Property	Mix design criteria	Volumetric Properties Predicted						
Bitumen (%)	6,0 - 7,5	**12,0**	**11,5**	**12,0**	**12,5**			
Air voids (%)	2,5 - 4,0	6,4	5,3	4,2	3,0			
VMA (%)	17,0 -	29,6	29,6	29,7	29,8			
VFB (%)	70,0 - 90,0	78,4	82,2	86,0	89,8			

Property	Mix design criteria	Predicted Performance (Permanent deformation resistance)						
Maximum ruth depth - Rdair (mm)	0,0 - 3,0	2,4 - 2,3	2,3 - 2,4	2,5 - 2,7	3,1 - 3,8			
Maximum wheel tracking slope - WTSair (%)	0,00 - 0,10	0,05 - 0,06	0,06 - 0,06	0,07 - 0,07	0,09 - 0,11			
Maximum proportional ruth depth - PRDair (%)	0,0 - 6,0	4,8 - 4,7	4,7 - 4,8	5 - 5,4	6,2 - 7,6			

Property	Mix design criteria	Predicted Performance (Fatigue resistance)						
Mixture Modulus (MPa)	1500 - 5000	1551 - 2422	1436 - 2254	1314 - 2073	1183 - 1876			
N_{ε_6}	300 -	419 - 671	452 - 728	494 - 800	549 - 894			

Property	Mix design criteria	Predicted Performance (Surface properties)						
Macrotexture (mm)	0,8 -	0,5	0,5	0,5	0,5			
Friction Resistance (BPN)	50 -	59,2	59,2	59,2	59,2			

AIII.4. Resistência à deformação permanente da ThinGap, para RAM

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

LNEC-EM Ensaios e Metrologia

UPAVMAT - Unidade de Pavimentos e Materiais para Infraestruturas de Transportes

DATA	EN 12697-22:2003+A1:2007	PROCESSO Nº
28//8/2017	Equipamento pequeno, procedimento B, acondicionamento ao ar	

PEDIDO Nº	Consulpav

IDENTIFICAÇÃO DOS PROVETES	3	4

PREPARAÇÃO DOS PROVETES PARA ENSAIO

	CONDIÇÕES (Escolher condição)	DATA DE ÍNICIO	HORA DE ÍNICIO	Referências normativas aplicadas
FABRICO DA MISTURA BETUMINOSA	Em Laboratório	06/01/1900		EN 12697-35:2016
COMPACTAÇÃO DA MISTURA BETUMINOSA	Recolhida do pavimento	07/01/1900		EN 12697-27:2017
PERIODO DE ARMAZENAMENTO (h), a uma temperatura ≤ 25 °C (mínimo 48 h)		06/01/1900		EN 12697-22:2003 +A1:2007 Procedimento B, ao ar
PERIODO DE PRÉ-CONDICIONAMENTO (h)	4 a 24 horas para espessuras ≤ 60 mm	06/01/1900		

CARACTERÍSTICAS DOS PROVETES E CONDIÇÕES DE ENSAIO

DATA: / HORA:		3	4	Referencias normativas aplicadas
BARIDADE (Mg/m³)	Preencher no método aplicado / Procedimento B (imersão)	2,750	2,800	EN 12697-6:2012 Método B (SSD)
AVALIAÇÃO DE CONFORMIDADE (*)		C	C	

TEMPERATURA DE ENSAIO (°C)	60	60	EN 12697-22:2003+A1:2007 Proced. B, acondicionamento ao ar

ESPESSURA DOS PROVETES (mm)		3		4		Aval. Conf.(**)		Referencias normativas aplicadas
		Leit.	Méd.	Leit.	Méd.	3	4	
Espessura nominal (mm)	50	50,0	50,4	50,4	50,6	C	C	EN 12697-22:2003+A1:2007 Procedimento B, acondicionamento ao ar
		50,0		50,9		C	C	
Tolerância (*)	2,5	50,9		50,3		C	C	
		50,6		50,6		C	C	

(*) Segundo o ponto 7.1.1.1 da norma, a baridade das duas lajetas não pode diferir ± 1% da baridade média

(**) Segundo o ponto 7.2.2 da norma, a espessura não pode diferir mais de 2,5mm da espessura nominal quando esta for ≤ 50mm, nem mais de 5% quando a espessura nominal for superior a 50mm

Equipamento utilizado: _____

OPERADOR: VISTO:

UPAVMAT/MEC.FRE.10.05 1/13

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

LNEC-EM Ensaios e Metrologia

UPAVMAT - Unidade de Pavimentos e Materiais para Infraestruturas de Transportes

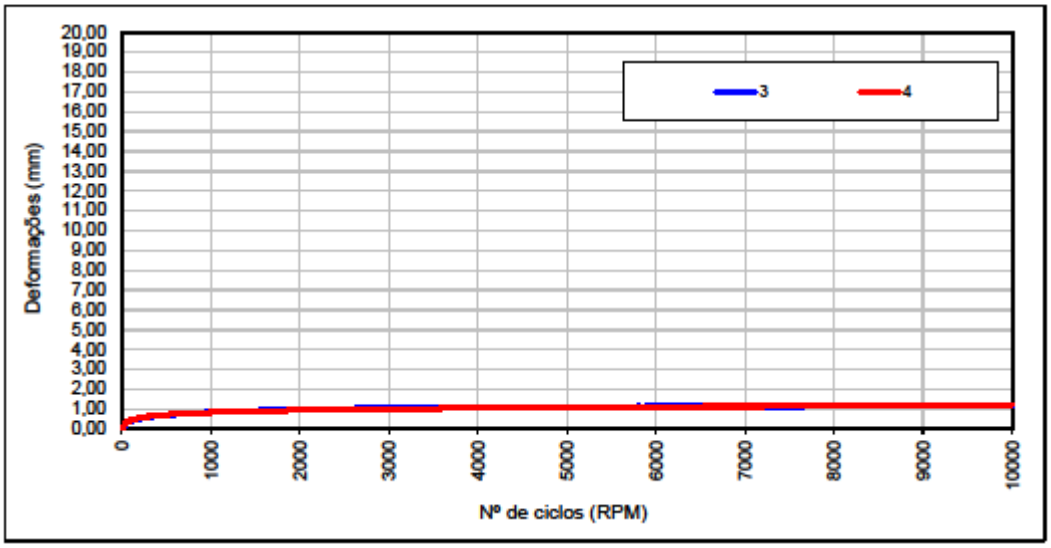
DATA		PROCESSO Nº
28/08/2017		

PEDIDO Nº	Consulpav

EN 12697-22:2003+A1:2007

Equipamento pequeno, procedimento B, acondicionamento ao ar

IDENTIFICAÇÃO	PARAMETRO	
3	Deformação máxima (profundidade de rodeira a 10000 ciclos), mm	1,17
4	Deformação máxima (profundidade de rodeira a 10000 ciclos), mm	1,21
	Média da profundidade de rodeira a 10000 ciclos (RD_{AIR}), mm	**1,2**
3	Taxa de deformação (entre o ciclo 5000 e 10000), mm/10^3 ciclos	0,01
4	Taxa de deformação (entre o ciclo 5000 e 10000), mm/10^3 ciclos	0,02
	Taxa de deformação média (WTS_{AIR}), mm/10^3 ciclos	**0,02**
3	Percentagem de profundidade de rodeira a 10000 ciclos	2,32
4	Percentagem de profundidade de rodeira a 10000 ciclos	2,39
	Média da percentagem da profundidade de rodeira (PRD_{AIR}), %	**2,4**



OPERADOR: VISTO:

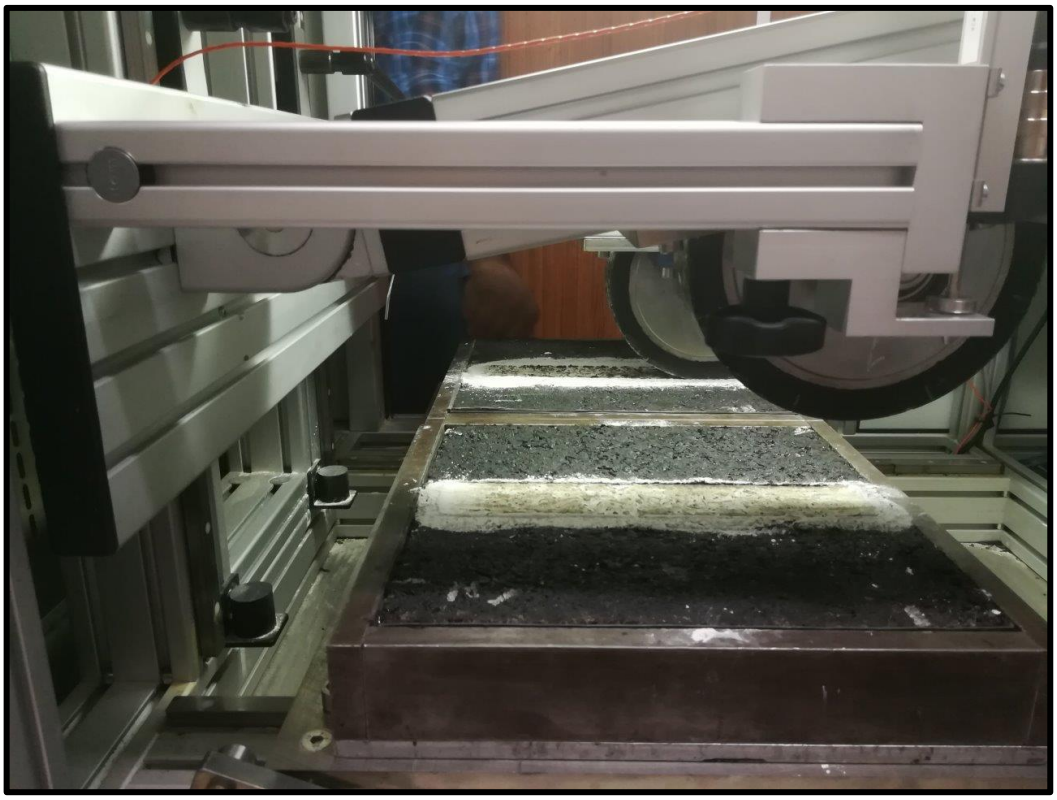


Figura 41 – Lajetas para ensaio de Wheel Tracking (1)

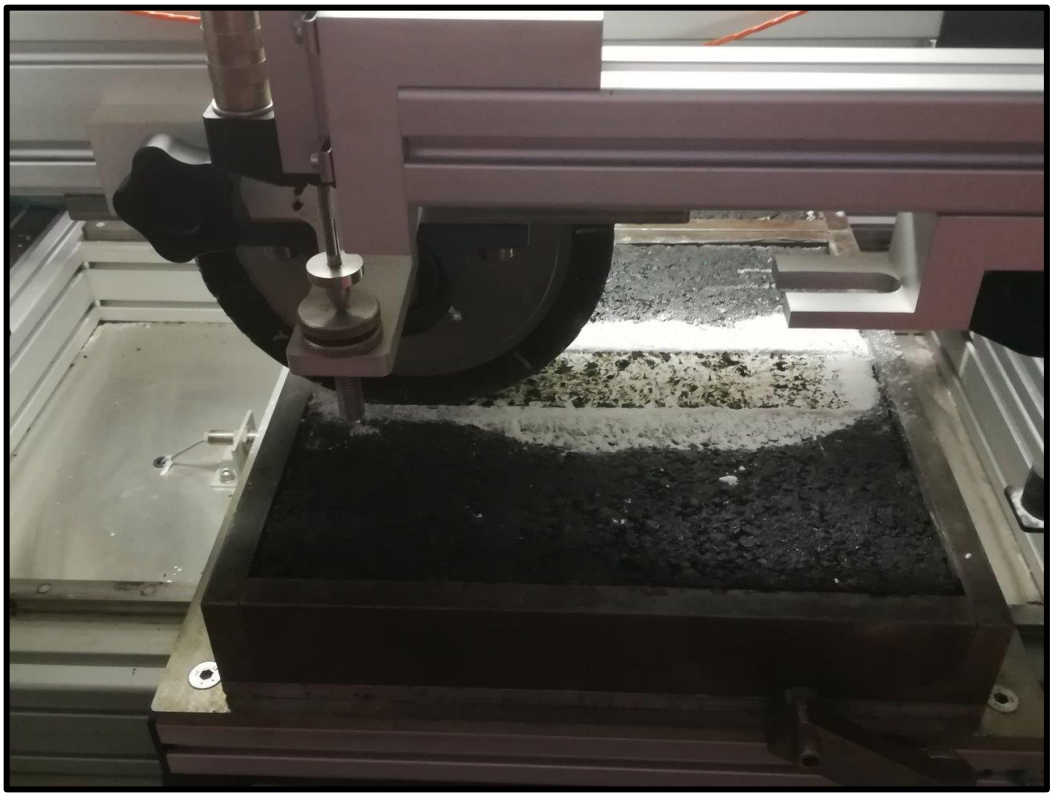


Figura 42 - Lajetas para ensaio de Wheel Tracking (2)

AIII.5. Resistência à derrapagem da ThinGap, para RAM

Pêndulo Britânico (Ensaio produzido no LNEC)		
Ensaio	**Coeficiente de atrito indireto (PVT)**	
	Provete 3	**Provete 4**
1	84	85
2	85	86
3	85	85
4	85	85
5	85	85
Temperatura da sala: 21ºC		

Tabela 53 – Resistência à derrapagem da mistura ThinGap com RAR desenvolvida para a RAM (PVT)

ANEXO IV

ESTUDO DE TRÁFEGO

UNIVERSIDADE da MADEIRA

Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia

Anexo

ESTIMATIVA DO TRÁFEGO NO TRECHO DE ESTUDO

1. NOTA INTRODUTÓRIA

O presente anexo pretende analisar a consistência das projeções que o MACOPAV recomenda, face aos dados de tráfego disponíveis para o trecho de estrada em estudo, adiante designado por trecho, localizado no extremo da ERº115 junto à rotunda da praça D. Francisco Santana, após a inserção do Caminho do Pilar no sentido descendente e antes da divergência para a Rua da Levada do Cavalo, no sentido ascendente, conforme Figura 1. O trecho tem um perfil de 2x2 faixas x vias, sem separador central.

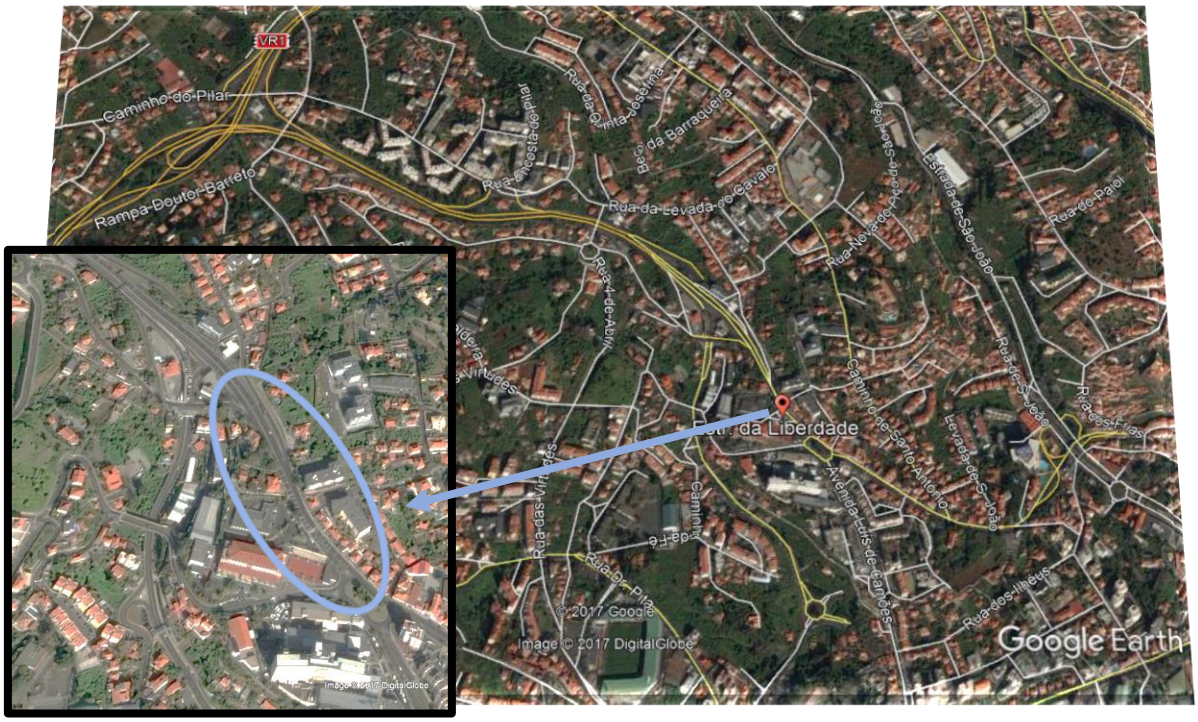


Figura 43 - Localização do trecho, pertencente à ERº115

Nem o trecho nem as estradas e ramos que lhe dão acesso imediato estão equipados com contadores de tráfego de qualquer tipo.

Para o estudo, foram tidos em conta:

iv) Vários recenseamentos de tráfego realizados de 2008 a 2011 pela EXACTO - Sociedade de Estudos e Planeamento, Lda para a Direção Regional de Estradas (DRE).

v) Recenseamento de tráfego realizados em 2015 junto à rotunda da Praça D. Francisco Santana (Hospital Dr. Nélio Mendonça) pela Câmara Municipal do Funchal (CMF);

vi) Filmagem do trecho realizada em janeiro de 2017 e registos de tráfego dos sublanços 8 e 9 da VR1, cedidos pela VIALITORAL.

O horizonte de projeto considerado foi o de 10 anos, pois adequa-se à reabilitação de um pavimento rodoviário flexível (Mello, Farias, Preussler, & Preussler, 2016).

2. DADOS DE TRÁFEGO DO TERCHO DISPONÍVEIS

2.1. Recenseamentos de Tráfego da EXACTO

A EXACTO realizou para a DRE os Recenseamentos de Tráfego à Rede Rodoviária da Ilha da Madeira de 2008, 2009, 2010 e 2011.

O total de tráfego diário contado no trecho nesses recenseamentos, nos dois sentidos (descendente e ascendente), foi o seguinte:

	Estimativa de TMDA	
	Total	% de pesados
2008	18.955	2,9
2009	23.192	2,5
2010	24.139	2,4
2011	23.660	2,4

Tabela 54 – Tráfego Médio Diário, segundo EXACTO

2.2. Recenseamento da Divisão de Mobilidade e Trânsito da CMF

Estudos de mobilidade da CMF, realizados pela Divisão de Mobilidade e Trânsito, incluíram uma contagem de tráfego, no sábado, dia 21 fevereiro de 2015 num período de 13 horas (7h às 20h), junto à Rotunda da Praça D. Francisco Santana, onde os movimentos 7 e 8 respeitam a contagens de tráfego da ERº115.

	Contagem de Tráfego (2015)	
	Total	% de pesados
7 (sentido descendente)	9.501	1,3
8 (sentido ascendente)	10.373	1,6

Tabela 55 – Contagem de tráfego para a ERº115 num período das 07h às 20h, segundo CMF

2.3. Filmagens do trecho e dados de tráfego da VR1

Para a quantificação do tráfego da ERº115 procedeu-se também, a 23 de janeiro de 2017, segunda-feira, a uma nova contagem de 24 horas com recurso a filmagem. O resultado foi o seguinte:

	Contagem de Tráfego (2017)	
	Total	% de pesados
sentido descendente	11.149	2,0
sentido ascendente	12.754	2,4

Tabela 56 – Contagem de tráfego que circula no trecho, com recurso a gravação de vídeo

3. ESTIMATIVA SIMPLIFICADA DO TRÁFEGO DO TRECHO

3.1. Projeção com base nas taxas de crescimento históricas

Para permitir estabelecer uma relação entre o tráfego recenseado a 21 de fevereiro de 2015 pela CMF com o de 23 de janeiro de 2017 desagregou-se esta última contagem por dois períodos: no total diário e no período das 7 às 20 h:

2017	Ligeiros	Pesados	Total	%pesados
Contagem das 7 às 20h	20.311	521	20.832	2,5 %
Contagem em 24h	23.103	551	23.903	2,3 %

Tabela 57 - Contagem com auxilio de uma filmagem, 23/01/2017

Admitiu-se então que a distribuição horária de tráfego no dia de contagens da CMF fosse aproximada à verificada no dia da contagem de 2017 e nos mesmos períodos e, nessa base, "estimou-se" o total de tráfego diário, por proporcionalidade direta, através de:

$$T_{2015}^{24h} = \frac{T_{2017}^{24h} \times T_{2015}^{13h}}{T_{2017}^{13h}} \quad (47)$$

A Tabela 5 sintetiza essa estimativa:

2015	Ligeiros	Pesados	Total	% pesados
Contagem das 7 às 20h	19.386	488	19.874	2,5%
Estimativa em 24h	22.051	516	22.567	2,3 %

Tabela 58 - Contagem da CMF, 21/05/2015 e estimativa de tráfego

Tendo em atenção o exposto, o histórico de "contagens" disponíveis no trecho será aproximadamente o seguinte:

	Dados Recolhidos
2008	**18.955**
2009	**23.192**
2010	**24.139**
2011	**23.660**
…	
2015	**22.567**
…	
2017	**23.903**

Tabela 59 – Variação do tráfego passado ao longo dos anos

Um desses registos, mais precisamente o de 2008, pareceu desde logo incongruente por ser pouco crível que, apenas num ano, de 2008 para 2009 e sem um fator de contexto que o justificasse, se tivesse assistido a um crescimento de 18.955 para 23.192 veículos/dia, de 22,4%.

Esse inusitado crescimento, estará com certeza relacionado com a abertura ao tráfego em outubro de 2009 da nova ligação em via expresso ao Porto do Funchal, ou seja, tem origem numa relevante alteração da topologia viária, fazendo com que se devam desprezar os registos anteriores. Tendo-se adicionalmente apurado que o recenseamento de tráfego de 2009 foi, pelo menos parte, realizado pela EXACTO também antes de outubro desse ano, não nos pareceu prudente utilizar o correspondente registo.

Assim, de 2010 até à contagem de janeiro de 2017, constatamos uma descida de tráfego, à taxa média anual na ordem de 0,1%. De 2015 para 2017 verificou-se, contudo, uma subida, a uma taxa média anual de 2,9% que, embora assente em dois registos muito recentes, se julga dever ser tida em conta para os propósitos deste trabalho.

O decrescimento anterior a essa retoma está associado, como é sabido, ao facto de Portugal e a RAM, a partir de 2010, terem começado a sofrer, primeiro, com a crise financeira internacional e, de seguida, com o evidenciar dos descalabros das finanças públicas que obrigaram o País e a Região a solicitarem apoio financeiro. Das medidas de austeridade subsequentes resultou uma forte redução do poder de compra e da atividade económica só sendo a procura sido retomada em 2014. Ora, para projetarmos "procuras" futuras para o dimensionamento de pavimentos, não nos devemos basear em projeções de períodos recessivos.

A mais completa e adequada analogia para estimarmos o tráfego futuro do trecho a que conseguimos aceder baseou-se nos registos de tráfego da VR1, onde o respetivo TMDA teve uma clara tendência "sinusoidal", de contínuo crescimento até 2009, depois, de decrescimento de 2010 a 2013 e, mais recentemente, de retoma de crescimento, a partir de 2014, tal como ilustrado no Anexo 3.

Daí que, para estimar a evolução de tráfego, se preferencie o último período de dados "disponíveis" do trecho, i.e., num período que se tem a certeza corresponder a crescimento da procura.

Em conformidade, admitindo que as contagens disponíveis de 2015 e de 2017 possam ser significativas do TMDA desses mesmos anos, calculou-se então, a respetiva taxa de crescimento médio anual e utilizou-se essa razão para obter uma 1º estimativa do tráfego futuro no trecho, conforme a Tabela 7 e a Figura 2.

O tráfego total no trecho em 2027, segundo a taxa de crescimento média anual atrás referida e com referência ao ano de 2015, será de 31.867 veíc./dia:

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
t=2,3%	24.600	25.318	26.057	26.817	27.599	28.405	29.233	30.086	30.964	31.867

Tabela 60 – Fluxo de tráfego no trecho para um periodo de dimensionamento de 10 anos

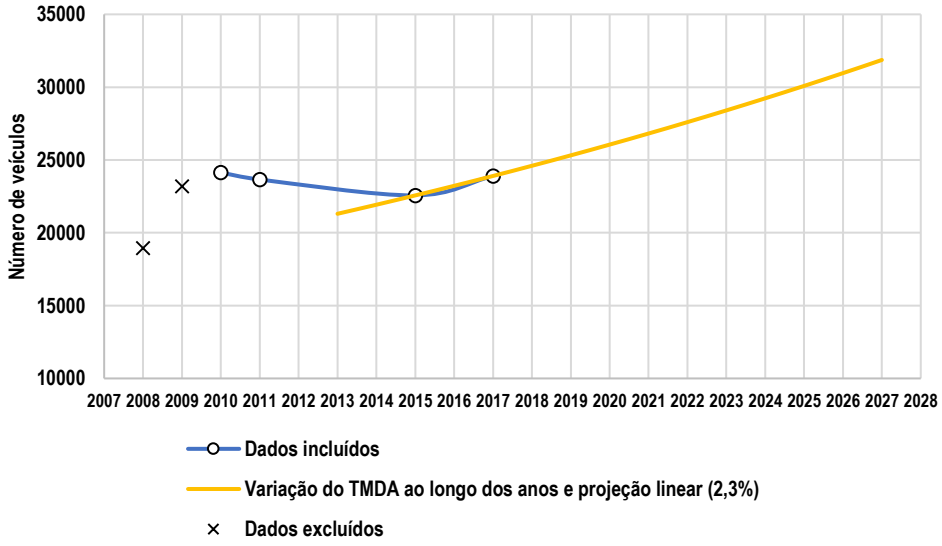


Figura 44 – Tráfego médio diário na próxima década (dois sentidos)

3.2. Projeção com base no MACOPAV

O MACOPAV preconiza o dimensionamento dos pavimentos rodoviários a partir da estimativa do número acumulado de passagens de eixos padrões no horizonte do projeto, no nosso caso de 130 kN. Essa estimativa é obtida tendo por base o tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura $(TMDA)_p$, por sentido de circulação e na via mais solicitada, a que se lhe aplica um fator de crescimento e um coeficiente de agressividade.

Dispõe-se de uma contagem recente para o trecho, datada de 23 de janeiro de 2017, com um total de 23.903 veíc./dia, com uma percentagem de veículos pesados de 2,3%. Note-se que o fator de crescimento do número acumulado de passagens do eixo padrão é função, mas não se confunde com a taxa de crescimento médio anual.

O MACOPAV considera diversas classes de tráfego médio diário anual de veículos pesados, em cada sentido e na via mais solicitada, admitindo-se neste caso prático lidarmos com uma classe de tráfego T_5 para o qual é recomendada uma taxa de crescimento médio anual de 3% que, para um horizonte de 10 anos, conduz a um $TMDA_p$ de 247 veíc./dia em 2017 nas vias direitas mais solicitadas a um N_{130}^{10}.igual a 621.110 passagens.

Para a taxa de crescimento médio anual de 3% subjacente aos cálculos pelo MACOPAV o tráfego total no trecho em 2027, será de 32.124 veíc./dia, conforme tabela e figura abaixo:

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
t=3,0%	255	262	270	278	287	295	304	313	323	332

Tabela 61 – Fluxo de tráfego no trecho para um periodo de dimensionamento de 10 anos

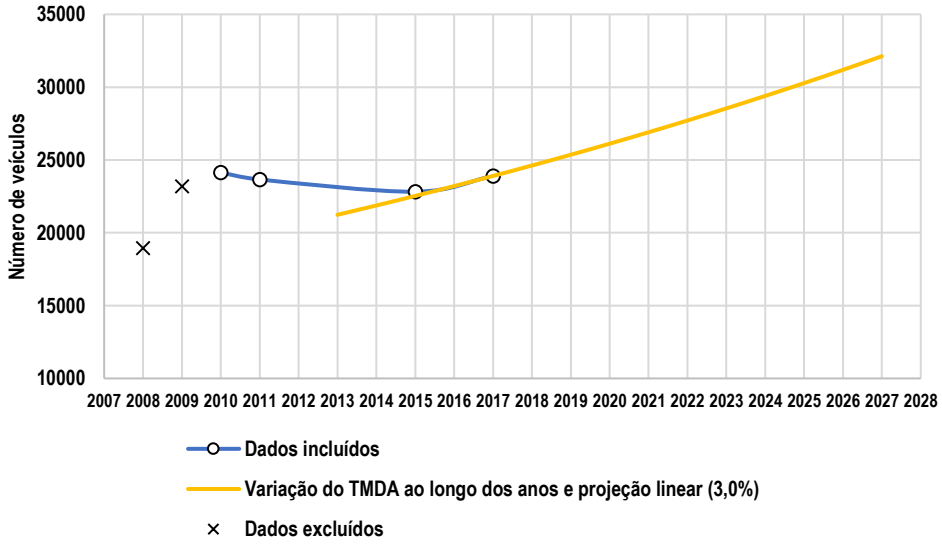


Figura 45 – Tráfego por dia na próxima década (dois sentidos)

4. ESTIMATIVA DE TRÁFEGO DO TRECHO COM BASE EM ANALOGIAS COM A PROCURA NA VR1

A VIALITORAL cedeu registos do tráfego na VR1 e as respetivas estimativas futuras[1] que, dada a sua qualidade e profundidade, se entendeu deverem também serem tidas em conta neste trabalho.

Os modelos de predição de tráfego da VTM utilizados pela VIALITORAL acabam por assentar num cenário central (média de cenários pessimista e otimista) tendo em conta:

iv. Evolução Preço de Combustíveis: o modelo de crescimento considera a evolução desta variável até 2025 em linha com as projeções do preço do barril de petróleo propostas pelo Banco Mundial. Em 2026 e 2027 considera uma evolução linear até 2030 considerando o valor projetado para esse ano. O exercício considera ainda o peso do Imposto sobre produtos petrolíferos (ISP) no preço final praticado ao público.

v. Crescimento real do PIB nacional: utilizando as previsões de crescimento real do PIB Nacional como *"proxi"* para a evolução do PIB Regional. A projeção de crescimento real do PIB Nacional foi atualizada com base nas mais recentes projeções de PIB, disponibilizadas pelo Banco de Portugal (para 2018 e 2019) e pelo "*The Economist Intelligence Unit*" (EIU), para os anos seguintes.

vi. Evolução das vendas de Cimento: a série considerada foi atualizada com o valor observado em 2016 (último ano completo)

Neste trabalho, a análise efetuada consistiu em testar quatro diferentes modelos de correlação do tráfego no trecho com os tráfegos nos sublanços 8 e 9 da VR1, selecionar um desses modelos, e, a partir das respetivas estimativas futuras de tráfego da VTM inferir qual a taxa de crescimento média anual implícita e, se mais exigente, alterando o crescimento preconizado pelo MACOPAV.

Ora, o tráfego que circula no trecho provém de três origens, identificadas na Figura 4.

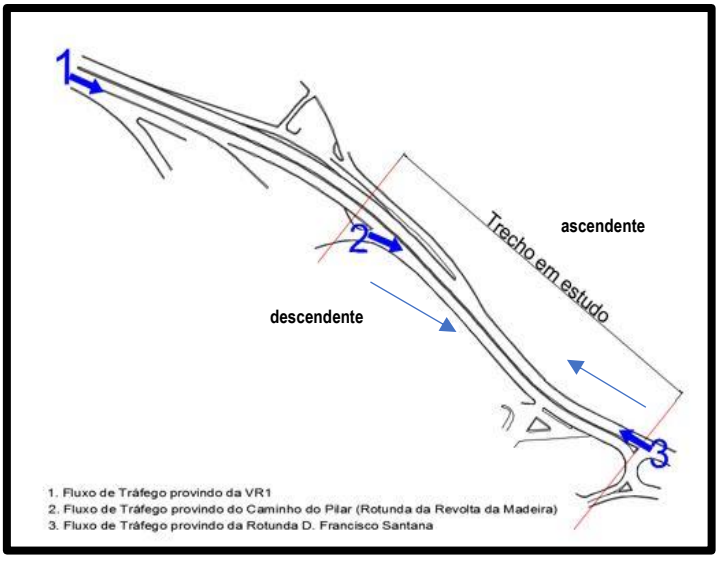


Figura 46 – Esquematização do trecho, pertencente à ERº115

[1] As estimativas de tráfego futuro da VIALITORAL são da autoria da VTM Consultores sendo semestralmente revistas e auditadas pela SIS, Transportes, Inovação e Sistemas.

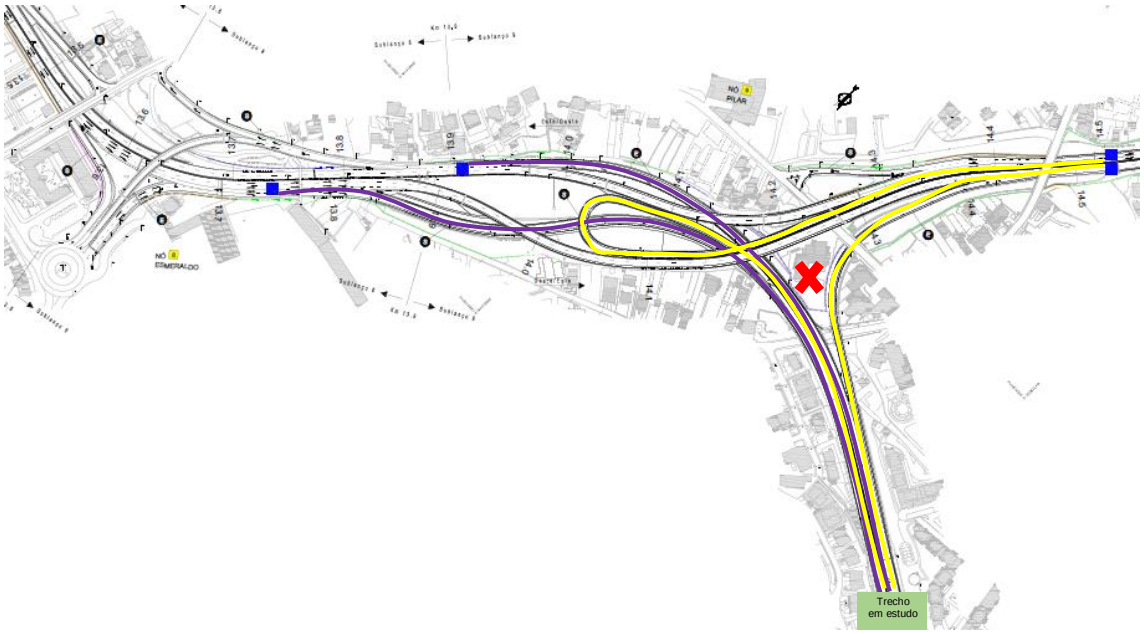
1. No sentido descendente, temos os seguintes contributos de tráfego:

1.1. Provindo da VR1, mais precisamente das duas vias direitas, sentido crescente, do sublanço 8 e de parte da via esquerda do sublanço 9, sentido decrescente (Figura 5). Antes de entroncar com o Caminho do Pilar no trecho o tráfego descendente da Estrada da Liberdade tem ainda duas saídas, uma para a rotunda da Revolta da Madeira/Caminho do Pilar e outra para o acesso ao Porto do Funchal (ER116).
1.2. Provindo do ramo de acesso da rotunda da Revolta da Madeira, através do Caminho do Pilar.

2. No sentido ascendente, o tráfego tem origem exclusiva na rotunda D. Francisco Santana (3). Esse tráfego a jusante do trecho, é:

2.3. Diminuído pelo tráfego que sai para a rua da Levada do Cavalo;
2.4. Aumentado com a confluência provinda do acesso ao Porto do Funchal (ER 116);
2.5. Diminuído com o tráfego que sai para a rotunda do Caminho do Pilar e aumentado com o que entra a partir daí;
2.6. Dividido junto à sede da VIALITORAL, para os sublanços 8, sentido decrescente e 9, sentido crescente (Figura 5).

O sublanço 8 da VR1 integra "*loops*" de indução eletromagnética em cada uma das suas vias, 4 no sentido crescente e 3 no sentido decrescente. Já o sublanço 9 da VR1 integra 4 "*loops*" dois em cada sentido, crescente e decrescente.



Legenda:

Contador/Classificador Automático de Veículos;
Sublanço 8;
Sublanço 9;
Trecho
Sede da VIALITORAL

Figura 47 – Esquematização da planta das vias dos sublanços 8 e 9, ligação ao trecho

A representação esquemática dos contadores da VR1 é apresentada nas seguintes figuras:

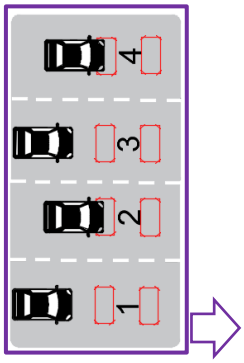


Figura 48 - Distribuição dos “loops” do contador do sublanço 8 no sentido crescente

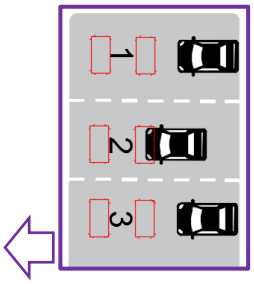


Figura 49 - Idem do sublanço 8 no sentido decrescente

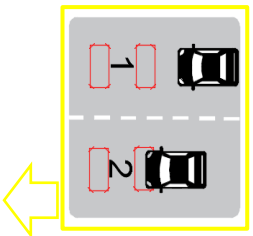


Figura 50 - Idem do sublanço 9 no sentido decrescente

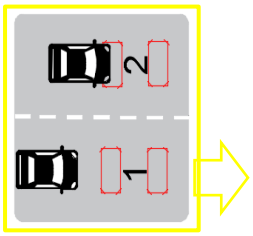
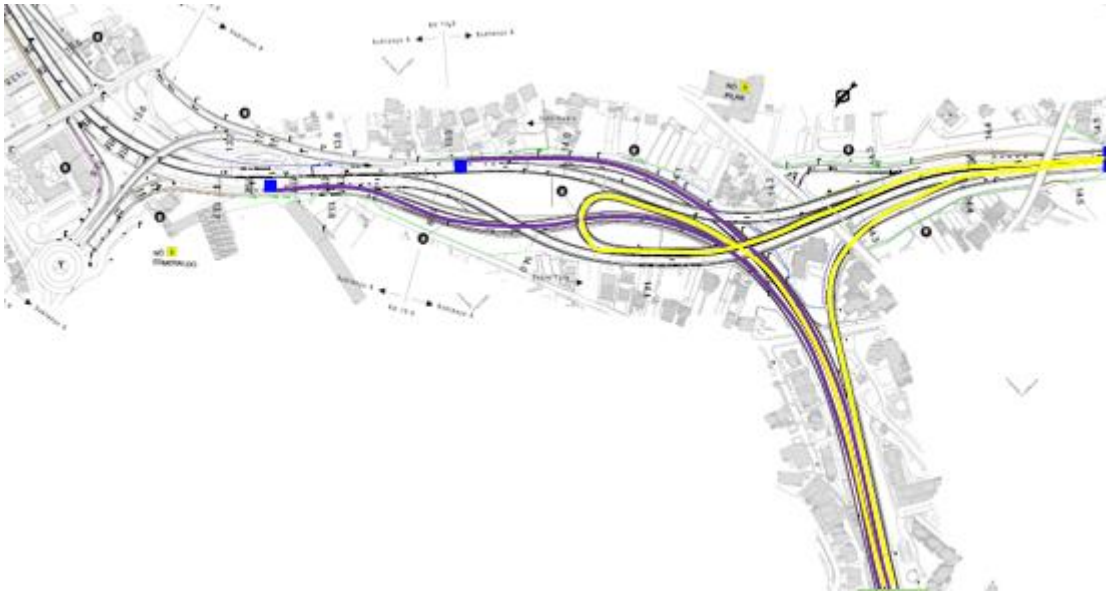


Figura 51 - Idem sublanço 9 no sentido crescente

Tendo-se obtido da VIALITORAL contagens de tráfego nos sublanços 8 e 9 da VR1 no dia 23/01/2017, procedeu-se a uma breve análise de sensibilidade quanto à validade de quatro modelos de correlação entre o tráfego do trecho com o verificado naqueles sublanços da VR1, quer na sua globalidade quer subdivididos por algumas das suas vias, conforme melhor adiante detalhado.

4.1. Modelo 1



Legenda:

Sublanço 8 da VR1;
Sublanço 9 da VR1;

Figura 52 - Esquematização das plantas da via – Deferenciação dos sentidos de tráfego

Optou-se pelo modelo sem termo independente, $T_{TRECHO}=K_1.T_8+K_2.T_9$, visto que era de esperar uma proporcionalidade direta entre o tráfego em cada sublanço e o tráfego no troço, o que é também confirmado pelos dados (veja-se o Gráfico 1).

A Tabela 9 apresenta as contagens no trecho, com recurso a uma filmagem, e os dados horários dos sublanços 8 e 9 no mesmo dia dos da VR1.

Horas	T_{TRECHO}	T_8	T_9	Horas	T_{TRECHO}	T_8	T_9
00h-01h	165	456	501	**12h-13h**	1.496	3.138	3.419
01h-02h	75	200	202	**13h-14h**	1.789	3.428	3.317
02h-03h	34	105	111	**14h-15h**	1.703	3.579	3.575
03h-04h	29	83	94	**15h-16h**	1.579	3.354	3.452
04h-05h	33	84	102	**16h-17h**	1.523	3.666	3.700
05h-06h	43	142	149	**17h-18h**	1.719	4.452	4.553
06h-07h	163	436	453	**18h-19h**	2.147	4.978	4.981
07h-08h	1.242	2.988	2.987	**19h-20h**	1.250	3.363	3.445
08h-09h	2.083	4.911	4.990	**20h-21h**	1.003	2.400	2.590
09h-10h	1.672	3.754	3.850	**21h-22h**	667	1.705	1.811
10h-11h	1.383	3.122	3.258	**22h-23h**	539	1.240	1.318
11h-12h	1.246	2.857	2.973	**23h-00h**	320	939	967

Tabela 62 – Dados horários do tráfego do trecho e dos sublanços 8 e 9

	Troço em estudo	Sublanço 8	Sublanço 9
média (veíc./hora)	996,0	2307,5	2366,6
desvio padrão	737,9	1666,0	1686,0
mínimo	29	83	94
mín. (7h - 20h)	1242	2857	2973
máximo	2147	4978	4990
Total (veíc./dia)	23903	55380	56798

Tabela 63 – Tráfego nos dois sentidos em 23/01/2017

O modelo 1 baseia-se na avaliação da correlação entre o tráfego do trecho e os totais dos tráfegos (nos dois sentidos) dos sublanços 8 e 9 da VR1.

Os coeficientes de determinação foram calculados com o programa SPSS, versão 24. Os restantes vetores da análise de regressão foram obtidos com o Excel 2016.

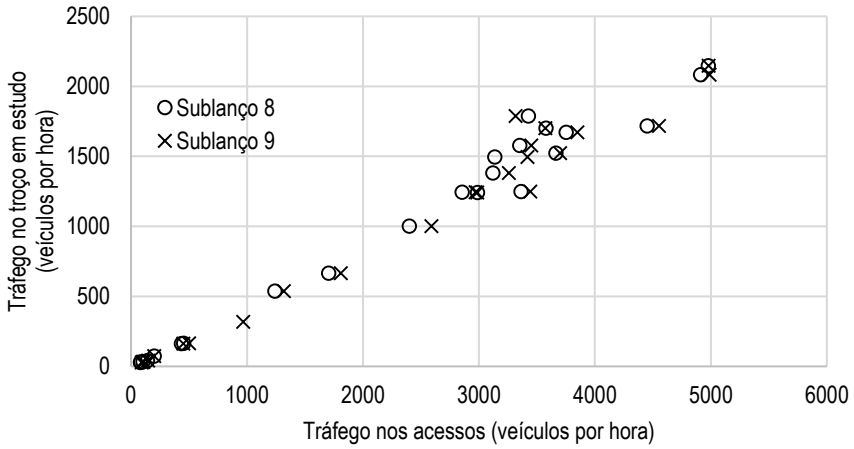


Gráfico 10 – Relação entre o tráfego no troço em estudo e o tráfego nos sublanços

Este modelo força a que a regressão passe pela origem do referencial, e pressupõe que o tráfego nulo nos sublanços 8 e 9, corresponde a um tráfego nulo no trecho, o que é apenas tendencialmente verdadeiro pois há tráfego contribuinte sem origem na VR1.

r^2 ajustado	Erro padrão da estimativa	Estatística *F*
0,992	107,531	F(2, 22) =1559,942

Tabela 64 – Índices de ajustamento do modelo

Variável resposta	Variáveis previsoras	Coeficientes	Erro padrão	Significância estatística
Tráfego no Trecho	T_8	0,720	0,292	p = 0,022
	T_9	-0,280	0,286	p = 0,339

Tabela 65 – Modelo de regressão múltipla para o tráfego total no trecho (Modelo 1)

De acordo com estes resultados, as variações do tráfego no trecho podem ser previstas em 99,2% pelo tráfego que circula nos sublanços 8 e 9, com uma margem de erro média de 107,5 veículos por hora. A relação linear entre o tráfego nos sublanços e o tráfego no trecho atinge a significância estatística, com p<0,001.

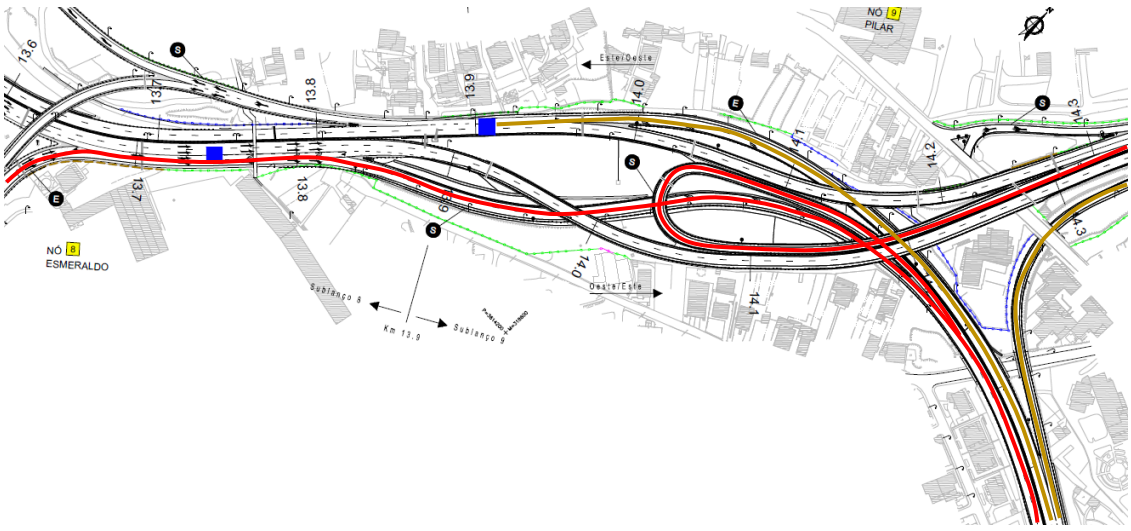
Apesar disso, o modelo ajustado pareceu insatisfatório em vários aspetos: os coeficientes das variáveis independentes têm erros padrões substanciais. O coeficiente correspondente ao sublanço 9 tem sinal negativo, o que implicaria uma relação inversa entre volume de tráfego nesse sublanço e o volume de tráfego no troço em estudo. Além de isto não corresponder ao padrão geral dos dados (Gráfico 1), não pareceu ter sentido. Por outro lado, o contributo do tráfego no sublanço 9 em chega a ser significativo do ponto de vista estatístico (p=0,339).

Podem-se apontar algumas deficiências ao modelo aqui considerado. Em primeiro lugar, modelar o tráfego total poderá não ser adequado se o tráfego ascendente e o descendente tiverem características muito distintas e pouca relação um com o outro. Em segundo lugar, há trafego que contribui para este troço sem ter origem na VR1. Finalmente, o sinal inesperado do coeficiente K_2 e os erros padrões elevados poderão dever-se ao facto de existir uma correlação extremamente alta entre o tráfego num e

noutro sublanço (r^2=0,992 no modelo sem constante), o que torna o processo de estimação instável.

Procurando ultrapassar estas deficiências, experimentou-se modelar em separado os dois sentidos de trânsito. Além disso, em vez de tomar como indicador todo o tráfego que circula nos sublanços 8 e 9, procurou-se focar na parte do tráfego destes sublanços que passa nas filas que dão acesso ao trecho. Os resultados obtidos são apresentados nas secções seguintes.

4.2. Modelo 2



Legenda:

Sentido Descendente;
Sentido Ascendente

Figura 53 - Esquematização das plantas da via – Diferenciação dos sentidos de tráfego

Trata-se de um modelo tipo:

$$T_{desc}=K_1.T_{8cresc}+K_2.T_{9decresc} \; ; \; T_{asc}=K_1.T_{8decresc}+K_2.T_{9cresc}$$

Para este modelo, no sentido descendente, apenas se consideram as contagens de tráfego diário do sublanço 8 no sentido crescente e as do sublanço 9 no sentido decrescente.

Este modelo força a que a regressão passe pela origem do referencial, e pressupõe que o tráfego nulo do sublanço 8, no sentido crescente da VR1 e do sublanço 9, sentido decrescente da VR1, corresponda a um tráfego nulo no trecho, o que apenas tendencialmente válido.

A tabela apresenta os dados recolhidos do trecho, em cada sentido, com recurso a uma filmagem, e os dados horários dos sublanços 8 e 9, nos sentidos pretendidos.

Horas	T_{desc}	T_{asc}	T_{8cresc}	$T_{9descres}$	$T_{8decresc}$	T_{9cres}
00h-01h	70	95	228	231	228	270
01h-02h	25	50	91	91	109	111
02h-03h	8	26	49	46	56	65
03h-04h	12	17	34	41	49	53
04h-05h	9	24	37	54	47	48
05h-06h	22	21	90	72	52	77
06h-07h	112	51	254	274	182	179
07h-08h	818	424	1.942	1.520	1.046	1.467
08h-09h	1249	834	2.836	2.639	2.075	2.351
09h-10h	921	751	2.042	2.075	1.712	1.775
10h-11h	715	668	1.667	1.686	1.455	1.572
11h-12h	558	688	1.460	1.509	1.397	1.464
12h-13h	686	810	1.598	1.766	1.540	1.653
13h-14h	815	974	1.937	1.482	1.491	1.835
14h-15h	908	795	1.932	1.852	1.647	1.723
15h-16h	672	907	1.765	1.735	1.589	1.717
16h-17h	634	889	1.933	1.759	1.733	1.941
17h-18h	656	1063	2.150	2.302	2.302	2.251
18h-19h	833	1314	2.319	2536	2.659	2.445
19h-20h	514	736	1.737	1.599	1.626	1.846
20h-21h	307	696	1.178	1.163	1.222	1.427
21h-22h	300	367	866	900	839	911
22h-23h	183	356	611	567	629	751
23h-00h	122	198	511	370	428	597

Tabela 66 - Dados horários do tráfego do trecho e dos sublanços 8 e 9, para cada sentido

4.2.1. Tráfego no Sentido Descendente

Resumo dos dados:

	T_{desc}	T_{8cresc}	$T_{9descres}$
média (veíc/hora)	464,5	1219,5	1177,9
desvio padrão	371,5	885,2	867,5
mínimo	8	34	41
mín. (7h - 20h)	514	1460	1482
máximo	1249	2836	2639
total (veíc/dia)	11149	29267	28269

Tabela 67 - Tráfego no sentido descendente em 23/01/2017

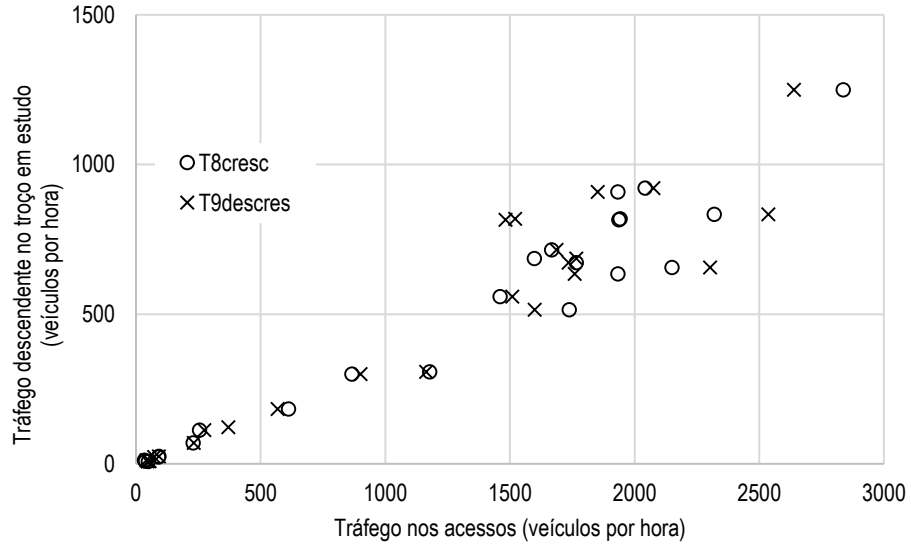


Gráfico 11 – Relação entre o tráfego no troço em estudo e o tráfego nos sublanços, no sentido descendente

r^2 ajustado	Erro padrão da estimativa	Estatística *F*
0,976	91,075	F(2, 22) =492,502

Tabela 68 - Índices de ajustamento do modelo

Variável resposta	Variáveis previsoras	Coeficientes	Erro padrão	Significância estatística
Tráfego no sentido descendente	T_{8cresc}	0,502	0,120	p < 0,001
	$T_{9decresc}$	-0,116	0,124	p = 0,360

Tabela 69 – Modelo de regressão múltipla para o tráfego descendente no trecho (Modelo 2)

4.2.2. Tráfego no Sentido Ascendente

Resumo dos dados:

	T_{asc}	$T_{8decresc}$	T_{9cres}
média (veíc/hora)	531,4	1088,0	1188,7
desvio padrão	397,3	800,0	825,9
mínimo	17	47	48
mín. (7h - 20h)	424	1046	1464
máximo	1314	2659	2445
total (veíc/dia)	12754	26113	28529

Tabela 70 - Tráfego no sentido ascendente em 23/01/2017

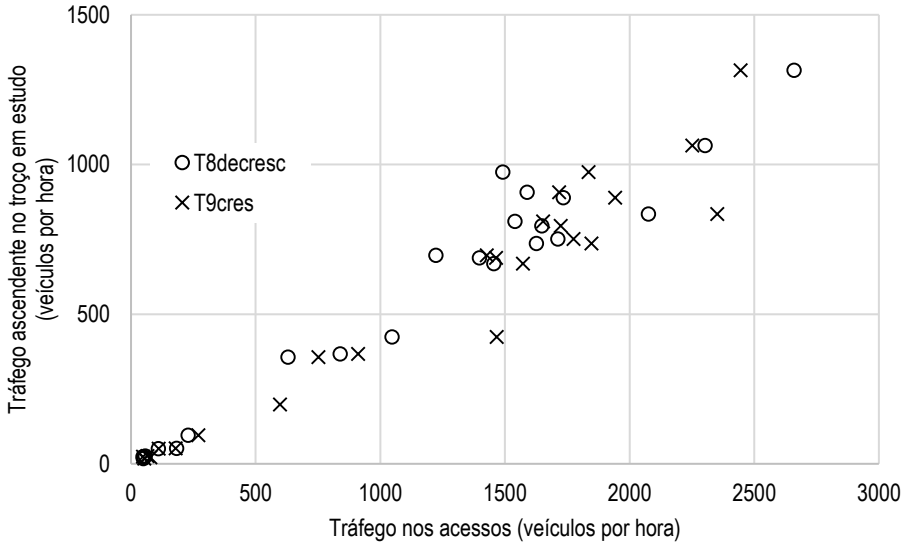


Gráfico 12 – Relação entre o tráfego no troço em estudo e o tráfego nos sublanços, no sentido ascendente

r^2 ajustado	Erro padrão da estimativa	Estatística *F*
0,985	83,40	F(2, 22) =737,242

Tabela 71 - Índices de ajustamento do modelo

Variável resposta	Variáveis previsoras	Coeficientes	Erro padrão	Significância estatística
Tráfego no sentido ascendente	$T_{8decresc}$	0,419	0,131	p = 0,004
	T_{9cresc}	0,064	0,122	p = 0,603

Tabela 72 – Modelo de regressão múltipla para o tráfego ascendente no trecho (Modelo 2)

Considerando os dois sentidos de tráfego em separado, o modelo 2 consegue reduzir apreciavelmente os erros padrões dos coeficientes e o erro padrão das estimativas, obtendo margens de erro médias de 91,1 veículos por hora no sentido descendente e 83,4 veículos por hora no sentido ascendente. Em contrapartida, a percentagem de variação explicada diminui de 99,2% no modelo 1 para 97,6% (sentido descendente) e 98,5% (sentido ascendente) no modelo 2.

A fim de comparar diretamente as projeções fornecidas pelo modelo 2 com as do modelo 1, ou com resultados de estudos anteriores, poderá ser preferível exprimir os resultados em termos do tráfego global (nos dois sentidos). Como este é a soma T = Tdesc + Tasc, estimou-se a sua margem de erro média pela fórmula:

$$s_T = \sqrt{s_{desc}^2 + s_{asc}^2 + 2r s_{desc} s_{asc}}$$

onde s_{desc} e s_{asc} são o erro padrão das estimativas para o tráfego em cada um dos sentidos, e r é a correlação entre o tráfego no sentido descendente e o tráfego no sentido ascendente. Os dados fornecem a estimativa r = 0,942 (num modelo linear sem constante), pelo que a margem de erro média para o tráfego total estimado, de acordo com o modelo 2, seria de 172,7 veículos por hora, ou 4145,3 por dia.

Este modelo leva, porém, a coeficientes de regressão difíceis de interpretar: O tráfego no sublanço 9 tem um peso negativo sobre o tráfego descendente no troço, e em ambos os sentidos de tráfego a relação entre o tráfego no sublanço 9 e o tráfego no troço não é estatisticamente significativa.

Uma crítica que se pode fazer ao modelo 2 é que nem todo o tráfego que circula nos sublanços 8 e 9 prossegue para o troço estudado, uma vez que só algumas filas de trânsito em cada sublanço dão acesso ao troço. Nas secções seguintes discutimos dois modelos que procuram levar em conta o fluxo de tráfego de modo mais preciso.

4.3. Modelo 3

Legenda:

- $T_{8cresc(1,2)}$;
- $T_{9decresc(2)}$;
- $T_{8desc(1)}$;
- $T_{9cresc(1)}$

Figura 54 - Esquematização das plantas da via – Diferenciação dos sentidos de tráfego

Trata-se de um modelo tipo:

$$T_{desc}=K_1.T_{8cresc(1,2,3)}+K_2.T_{9decresc(2)};T_{asc}=K_1.T_{8decresc(1)}+K_2.T_{9cresc(1)}$$

Para este modelo, no sentido descendente, apenas se consideram as contagens das três vias mais à direita (1, 2, 3) do sublanço 8 no sentido crescente da VR1, pois são as vias que fazem ligação ao trecho. Posteriormente, o fluxo de tráfego contabilizado pelo contador do sublanço 9 no sentido decrescente, será apenas considerado a via mais à esquerda (2), pois é a via de ligação à ERº 115.

Para o sentido ascendente do trecho, considera-se o fluxo de tráfego contabilizado na via mais à direita do sublanço 8 no sentido decrescente da VR1. A outra fonte é contabilizada pelo contador do sublanço 9 no sentido crescente, a via mais à direita (1).

Este modelo força a que a regressão passe na origem do referencial, e corresponde a pressupor que o tráfego nulo dos sublanços 8 e 9 da VR1 ajuste a um tráfego nulo no trecho, o que apenas tendencialmente verdadeiro pois há tráfego contribuinte sem origem na VR1.

A tabela apresenta os dados recolhidos do trecho, em cada sentido, e os dados horários dos sublanços 8 e 9, nos sentidos pretendidos, mas somente para as filas que desembocam no troço em estudo.

Horas	T_{desc}	T_{asc}	$T_{8cresc(1,2,3)}$	$T_{9decresc(2)}$	$T_{8decresc(1)}$	$T_{9cresc(1)}$
00h-01h	70	95	202	68	72	227
01h-02h	25	50	81	13	30	104
02h-03h	8	26	42	8	15	63
03h-04h	12	17	30	11	19	51
04h-05h	9	24	31	9	12	46
05h-06h	22	21	83	20	20	72
06h-07h	112	51	226	110	47	154
07h-08h	818	424	1.375	833	270	873
08h-09h	1249	834	2.015	1.488	621	1.290
09h-10h	921	751	1.597	1.050	546	1.100
10h-11h	715	668	1.341	794	452	1.059
11h-12h	558	688	1.196	659	455	982
12h-13h	686	810	1.297	838	513	1.096
13h-14h	815	974	1.540	560	532	1.160
14h-15h	908	795	1.569	860	585	1.112
15h-16h	672	907	1.409	775	526	1.129
16h-17h	634	889	1.519	744	546	1.208
17h-18h	656	1063	1.638	1.088	686	1.314
18h-19h	833	1314	1.700	1.249	768	1.404
19h-20h	514	736	1.352	702	444	1.150
20h-21h	307	696	951	445	338	966
21h-22h	300	367	734	341	267	739
22h-23h	183	356	541	176	178	640
23h-00h	122	198	441	110	125	525

Tabela 73 - Dados horários do tráfego do trecho e dos sublanços 8 e 9, para cada sentido

4.3.1. Tráfego no Sentido Descendente

Resumo dos dados:

	T_{desc}	$T_{8cresc(1,2,3)}$	$T_{9decresc(2)}$
média (veíc./hora)	464,5	954,6	539,6
desvio padrão	371,5	663,0	447,6
mínimo	8	30	8
mín. (7h - 20h)	514	1.196	560
máximo	1.249	2015	1.488
Total (veíc./dia)	11.149	22.910	12.951

Tabela 74 - Tráfego no sentido descendente em 23/01/2017

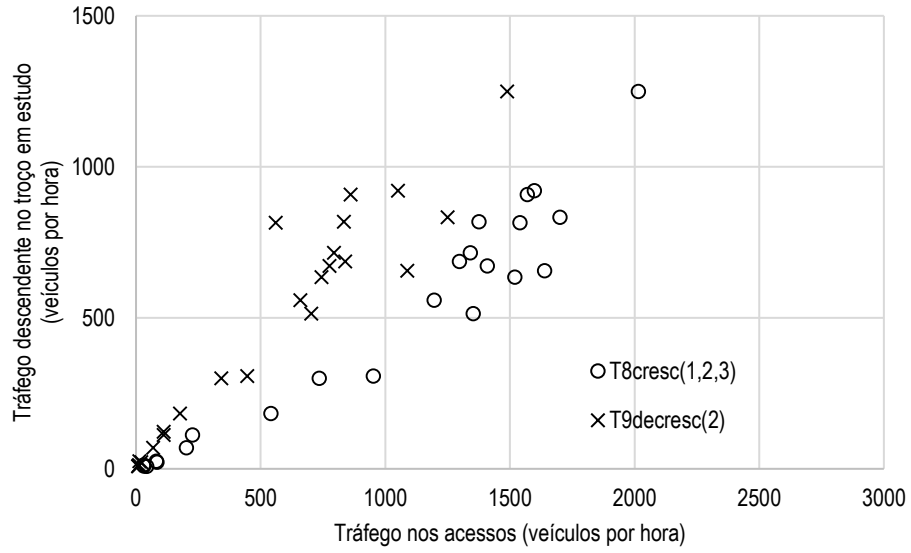


Gráfico 13 – Relação entre o tráfego no troço em estudo e o tráfego nos sublanços, no sentido descendente

r^2 ajustado	Erro padrão da estimativa	Estatística *F*
0,975	92,60	F(2, 22) =476,033

Tabela 75 - Índices de ajustamento do modelo

Variável resposta	Variáveis previsoras	Coeficientes	Erro padrão	Significância estatística
Tráfego no sentido descendente	$T_{8cresc(1,2,3)}$	0,308	0,086	p = 0,002
	$T_{9decresc(2)}$	0,330	0,144	p = 0,031

Tabela 76 – Modelo de regressão múltipla para o tráfego descendente no trecho (Modelo 3)

4.3.2. Tráfego no Sentido Ascendente

Resumo dos dados:

	T_{asc}	$T_{8decresc(1)}$	$T_{9crec(1)}$
média (veíc/hora)	531,4	336,1	769,3
desvio padrão	397,3	248,4	480,9
mínimo	17	12	46
mín. (7h - 20h)	424	270	873
máximo	1.314	768	1.404
Total (veíc/dia)	12.754	8.067	18.464

Tabela 77 – Tráfego no sentido ascendente em 23/01/2017

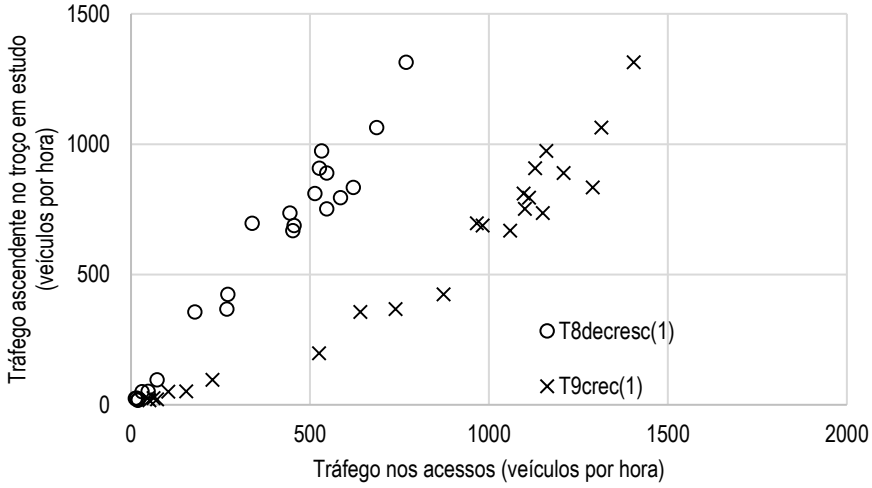


Gráfico 14 – Relação entre o tráfego no troço em estudo e o tráfego nos sublanços, no sentido ascendente

r^2 ajustado	Erro padrão da estimativa	Estatística *F*
0,943	73,10	F(2, 22) =962,860

Tabela 78 - Índices de ajustamento do modelo

Variável resposta	Variáveis previsoras	Coeficientes	Erro padrão	Significância estatística
Tráfego no sentido ascendente	$T_{8decresc(1)}$	1,293	0,230	p < 0,001
	$T_{9cresc(1)}$	0,133	0,106	p = 0,223

Tabela 79 – Modelo de regressão múltipla para o tráfego ascendente no trecho (Modelo 3)

De acordo com estes resultados, as variações do tráfego no trecho descendente e ascendente podem ser previstas em 97,5% e 94,3%, pelo tráfego que circula nos sublanços 8 e 9, com uma margem de erro média de 92,60 veículos por hora, no sentido descendente e no ascendente de 73,10 veículos por hora. A relação linear entre o tráfego nos sublanços e o tráfego no trecho atinge a significância estatística, com $p<0,001$.

Embora o erro padrão, para o sentido descendente, seja ligeiramente maior do que o calculado para modelo 2, o modelo 3 proporciona estimativas com sentido para todos os coeficientes. No entanto, tentou-se um modelo mais consistente, sendo necessário fazer uma análise mais fina dos fluxos de tráfego entre os sublanços e o troço em estudo.

Recorre-se a uma subtração, para o sentido descendente do trecho, de maneira a aprimorar do modelo, ou seja, em termos de tráfego no sentido decrescente do sublanço 9, é muito generalizado considerar que o tráfego que circula na via mais à esquerda desse sublanço encaminha-se todo para o trecho. Tal como a Figura 12 ilustra, uma das origens de tráfego no trecho é o sublanço 9 no sentido decrescente da via mais à esquerda (2), contudo nem todo esse tráfego dirige-se para o trecho em avaliação, pois parte dele permanece na VR1.

Quanto à subtração feita no sentido ascendente do trecho deve-se ao tráfego contabilizado no sublanço 9 da VR1, no sentido crescente e na via mais à direita (1). Não é correto assumir que o fluxo de tráfego contabilizado pelo contador dessa via teve origem apenas no trecho em estudo, pois parte desse fluxo pertence ao tráfego que continuou na VR1, mais precisamente o contabilizado no sublanço 8 no sentido crescente, nas vias mais à esquerda (3 e 4).

O aperfeiçoamento do modelo 3, encontra-se descrito na próxima secção.

4.4. Modelo 4

Legenda:

- $T_{8cresc(1,2,3)}$;
- $T_{9decresc(1,2)} – 8decresc(2,3)$;
- $T_{8desc(1)}$;
- $T_{9cresc} – 8cresc(4)$

Figura 55 - Esquematização das plantas da via – Diferenciação dos sentidos de tráfego

Trata-se de um modelo tipo:

$$T_{desc}=K_1.T_{8cresc(1,2,3)}+K_2.T_{9decresc(1,2)-8decresc(2,3)};T_{asc}=K_1.T_{8decresc(1)}+K_2.T_{9cresc-8cresc(4)}$$

Este modelo força a que a regressão passe pela origem do referencial, e corresponde a pressupor que o tráfego nulo dos sublanços 8 e 9 da VR1 ajuste a um tráfego nulo no trecho, o que apenas tendencialmente verdadeiro pois há tráfego contribuinte sem origem na VR1.

Para este modelo, no sentido descendente, apenas se consideram as contagens das três vias mais à direita (1, 2, 3) do sublanço 8 no sentido crescente da VR1, pois são as vias que fazem ligação ao trecho. Posteriormente, o fluxo de tráfego contabilizado pelo contador do sublanço 9 no sentido decrescente, ser-lhe-á retirado o tráfego do sublanço 8 no sentido decrescente, mais precisamente o contabilizado pelas vias mais à esquerda (2, 3).

Para o sentido ascendente do trecho, considera-se o fluxo de tráfego contabilizado na via mais à direita do sublanço 8 no sentido decrescente da VR1. A outra fonte é contabilizada pelo contador do sublanço 9 no sentido crescente, sendo-lhe retirado o tráfego do sublanço 8 no sentido crescente, mais precisamente o contabilizado pela via mais à esquerda (4).

A tabela apresenta os dados recolhidos do trecho, em cada sentido, e os dados horários dos sublanços 8 e 9, nos sentidos pretendidos.

Horas	T_{desc}	T_{asc}	$T_{8cresc(1,2,3)}$	$T_{9decresc(1,2)-8decresc(2,3)}$	$T_{8decresc(1)}$	$T_{9cresc(1,2)-8cresc(4)}$
00h-01h	70	95	202	75	72	244
01h-02h	25	50	81	12	30	101
02h-03h	8	26	42	5	15	58
03h-04h	12	17	30	11	19	49
04h-05h	9	24	31	19	12	42
05h-06h	22	21	83	40	20	70
06h-07h	112	51	226	139	47	151
07h-08h	818	424	1.375	744	270	900
08h-09h	1.249	834	2.015	1.185	621	1.530
09h-10h	921	751	1.597	909	546	1.330
10h-11h	715	668	1.341	683	452	1.246
11h-12h	558	688	1.196	567	455	1.200
12h-13h	686	810	1.297	739	513	1.352
13h-14h	815	974	1.540	523	532	1.438
14h-15h	908	795	1.569	790	585	1.360
15h-16h	672	907	1.409	672	526	1.361
16h-17h	634	889	1.519	572	546	1.527
17h-18h	656	1.063	1.638	686	686	1.739
18h-19h	833	1.314	1.700	645	768	1.826
19h-20h	514	736	1.352	417	444	1.461
20h-21h	307	696	951	279	338	1.200
21h-22h	300	367	734	328	267	779
22h-23h	183	356	541	116	178	681
23h-00h	122	198	441	67	125	527

Tabela 80 - Dados horários do tráfego do trecho e dos sublanços 8 e 9, para cada sentido

4.4.1. Tráfego no Sentido Descendente

Resumo dos dados:

	T_{desc}	$T_{8cresc(1,2,3)}$	$T_{9decresc} - T_{8descres(2,3)}$
média (veíc/hora)	464,5	954,6	426,0
desvio padrão	371,5	663,0	344,6
mínimo	8	30	5
mín. (7h - 20h)	514	1.196	417
máximo	1249	2.015	1.185
total (veíc/dia)	11149	22.910	10.223

Tabela 81 - Tráfego no sentido descendente em 23/01/2017

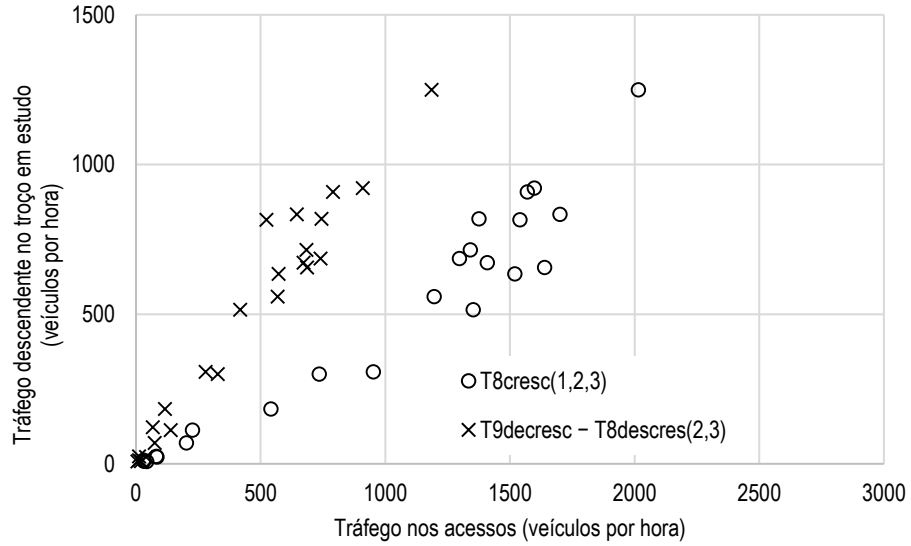


Gráfico 15 – Relação entre o tráfego no troço em estudo e o tráfego nos sublanços, no sentido descendente

r^2 ajustado	Erro padrão da estimativa	Estatística *F*
0,989	60,698	F(2, 22) =1122,556

Tabela 82 - Índices de ajustamento do modelo

Variável resposta	Variáveis previsoras	Coeficientes	Erro padrão	Significância estatística
Tráfego no sentido descendente	$T_{8cresc(1,2,3)}$	0,185	0,051	p = 0,001
	$T_{9decresc} - T_{8descres(2,3)}$	0,693	0,107	p < 0,001

Tabela 83 – Modelo de regressão múltipla para o tráfego descendente no trecho (Modelo 4)

4.4.2. Tráfego no Sentido Ascendente

Resumo dos dados:

	T_{asc}	$T_{8decresc(1)}$	$T_{9cresc} - T_{8cres(4)}$
média (veíc/hora)	531,4	336,1	923,8
desvio padrão	397,3	248,4	616,6
mínimo	17	12	42
mín. (7h - 20h)	424	270	900
máximo	1.314	768	1.826
total (veíc/dia)	12.754	8.067	22.172

Tabela 84 - Tráfego no sentido ascendente em 23/01/2017

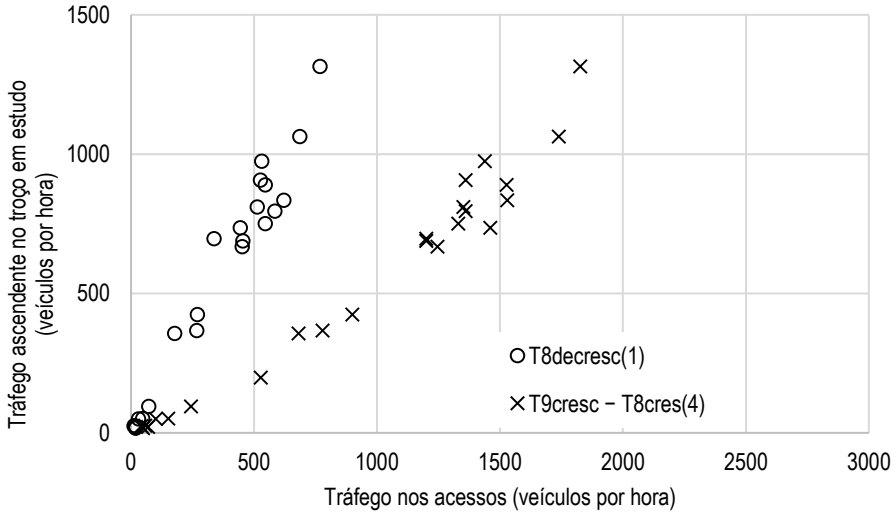


Gráfico 16 – Relação entre o tráfego no troço em estudo e o tráfego nos sublanços, no sentido ascendente

r^2 ajustado	Erro padrão da estimativa	Estatística *F*
0,990	67,331	F(2, 22) =1136,910

Tabela 85 - Índices de ajustamento do modelo

Variável resposta	Variáveis previsoras	Coeficientes	Erro padrão	Significância estatística
Tráfego no sentido ascendente	$T_{8decresc(1)}$	0,920	0,275	p = 0,003
	$T_{9cresc} - T_{8cres(4)}$	0,249	0,104	p = 0,025

Tabela 86 – Modelo de regressão múltipla para o tráfego ascendente no trecho (Modelo 4)

O modelo 4 reduz mais ainda os erros padrões e aumenta ligeiramente o r^2 múltiplo. E ainda, proporciona estimativas com sentido para todos os coeficientes e, por isso, foi o selecionado.

Os resultados apontam para que o tráfego em ambos os sublanços seja útil como preditor do tráfego no sublanço em estudo. No sentido descendente o tráfego proveniente do sublanço 9 é, dos dois, o que tem uma relação mais forte com o do troço, enquanto no caso do sentido ascendente é o tráfego proveniente do sublanço 8 que mais está associado ao tráfego no troço estudado.

A tabela seguinte representa a variação anual de 2008 a 2016 das contribuições das diferentes vias para os TMDA´s dos respetivos sublanços:

Ano	N1	N2	N3	S1	S2	S3	S4	TMDA
2008	16%	22%	11%	9%	16%	14%	12%	**50.711**
2009	15%	22%	11%	10%	16%	14%	12%	**51.758**
2010	15%	22%	11%	11%	16%	14%	12%	**52.015**
2011	15%	22%	10%	10%	16%	14%	12%	**51.818**
2013	15%	23%	9%	11%	17%	14%	11%	**47.252**
2014	16%	22%	10%	11%	14%	17%	11%	**47.224**
2015	15%	22%	10%	11%	10%	20%	12%	**49.921**
2016	15%	23%	10%	11%	11%	19%	11%	**51.835**
Contributo Médio	**15%**	**22%**	**10%**	**11%**	**14%**	**16%**	**12%**	**402.534**

Tabela 87 – Contribuições das vias no sublanço 8

Ano	N1	N2	S1	S2	TMDA
2008	29%	21%	32%	18%	**52.090**
2009	29%	21%	32%	18%	**53.414**
2010	28%	22%	32%	18%	**54.763**
2011	28%	22%	32%	18%	**53.272**
2013	28%	21%	34%	17%	**49.430**
2014	28%	22%	32%	18%	**50.628**
2015	28%	22%	33%	18%	**51.991**
2016	28%	22%	32%	18%	**53.505**
Contributo Médio	**28%**	**22%**	**32%**	**18%**	**419.093**

Tabela 88 - Contribuições das vias no sublanço 9

O tráfego previsível conforme se pode verificar da tabela e figura seguintes contém uma provável atenuação da procura e, em valores absolutos, é consideravelmente inferior ao das duas previsões anteriormente estudadas, com uma taxa de crescimento médio anual da ordem de 1,1%, levando-nos a concluir que a estimativa do MACOPAV é conservadora e adequada ao dimensionamento em causa.

ANO	VTM		Modelo 4		
	Sublanço 8	Sublanço 9	$T_{descendente}$	$T_{ascendente}$	T_{TRECHO}
2017	54.435	55.735	11.174	12.988	24.163
2018	55.444	56.771	11.383	13.229	24.612
2019	56.379	57.730	11.575	13.453	25.028
2020	57.275	58.649	11.760	13.667	25.426
2021	58.132	59.528	11.936	13.871	25.807
2022	58.839	60.253	12.082	14.040	26.122
2023	59.444	60.874	12.206	14.185	26.391
2024	59.944	61.387	12.309	14.304	26.614
2025	60.335	61.789	12.390	14.398	26.788
2026	60.673	62.135	12.459	14.478	26.938
2027	60.957	62.426	12.518	14.546	27.064

Tabela 89 - Evolução do tráfego com base nas estimativas VTM, segundo Modelo 4

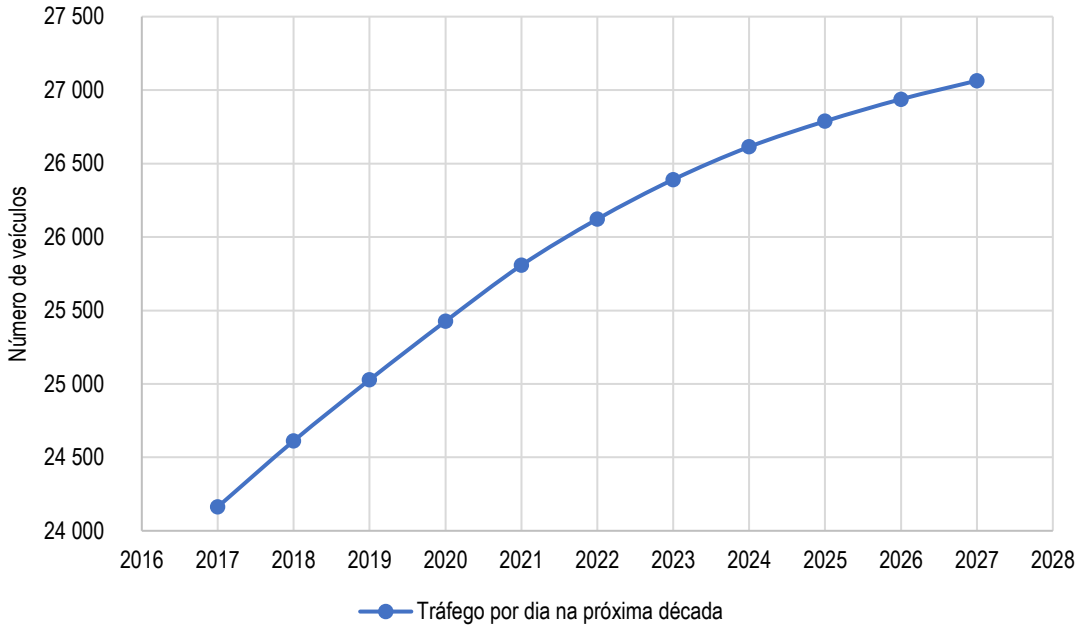


Figura 56 – Projeção de tráfego no trecho a partir das estimativas da VTM

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tabela seguinte resume as estimativas de tráfego para o trecho num período de dimensionamento de 10 anos, de três formas distintas:

Crescimentos	Mantendo o crescimento dos dois últimos anos	Respeitando a taxa do MACOPAV	Modelo VTM
TMDA (2027)	31.867	32.124	27.064

Tabela 90 – Projeção de tráfego para 2027

Prudencialmente, por ter conduzido a um maior valor e por subsequentes análises de sensibilidade permitirem inferir que a consideração de tráfego inferior não conduziria a importantes diferenças no dimensionamento, preferenciaram-se os critérios do MACOPAV.

ANEXO 1

As tabelas anexadas neste anexo referem-se aos dados obtidos para o Tráfego Médio Diário Anual, desde 2008 a 2011, para os sublanços 8 e 9 da VR1.

Sublanço 8/2008										
mês	dias	N1	N2	N3	S1	S2	S3	S4	Total	TMD
01	31	248 175	336 951	169 370	146 002	238 073	229 713	184 291	1 552 575	50 083
02	29	232 619	311 086	152 612	135 028	228 824	209 338	169 358	1 438 865	49 616
03	31	242 447	333 065	158 190	137 289	244 782	220 504	179 108	1 515 385	48 883
04	30	242 232	332 231	160 632	140 500	240 089	215 772	178 801	1 510 257	50 342
05	31	248 467	337 944	162 533	141 879	250 081	223 974	183 195	1 548 073	49 938
06	30	238 585	331 076	157 014	137 998	240 583	219 554	177 478	1 502 288	50 076
07	31	245 026	355 143	171 280	153 664	257 864	233 112	193 245	1 609 334	51 914
08	31	217 564	346 760	157 737	137 171	231 746	229 598	179 073	1 499 649	48 376
09	30	233 956	334 308	159 711	152 381	237 888	223 475	179 189	1 520 908	50 697
10	31	309 120	346 250	186 383	162 029	245 340	226 696	189 339	1 665 157	53 715
11	30	302 507	328 639	172 516	153 572	241 876	217 454	176 875	1 593 439	53 115
12	31	275 238	340 716	161 024	159 864	253 604	232 908	181 115	1 604 469	51 757
TMDA	366	8 295	11 022	5 380	4 802	7 953	7 328	5 932	50 711	

Tabela 91 – TMDA das Vias do Sublanço 8 em 2008

Sublanço 9/2008							
mês	dias	N1	N2	S1	S2	Total	TMD
01	31	472 132	344 794	517 691	290 337	1 624 954	52 418
02	29	437 251	318 870	482 065	266 998	1 505 184	51 903
03	31	463 802	335 141	508 348	285 435	1 592 726	51 378
04	30	459 077	334 251	504 439	283 790	1 581 557	52 719
05	31	472 351	339 102	516 205	289 243	1 616 901	52 158
06	30	456 024	328 846	498 089	277 481	1 560 440	52 015
07	31	486 588	349 034	529 590	295 364	1 660 576	53 567
08	31	465 531	324 850	505 996	263 215	1 559 592	50 309
09	30	460 638	332 441	501 960	274 498	1 569 537	52 318
10	31	449 601	368 113	520 595	293 176	1 631 485	52 629
11	30	426 071	345 810	499 624	278 044	1 549 549	51 652
12	31	465 027	337 523	523 637	286 422	1 612 609	52 020
TMDA	366	15 066	11 090	16 689	9 246	52 090	

Tabela 92 - TMDA das Vias do Sublanço 9 em 2008

Sublanço 8/2009										
mês	dias	N1	N2	N3	S1	S2	S3	S4	Total	TMD
01	31	249 305	344 672	169 937	158 947	249 083	225 050	184 842	1 581 836	51 027
02	28	218 983	308 432	149 369	141 856	225 825	199 983	163 867	1 408 315	50 297
03	31	248 152	348 198	172 579	159 900	253 886	224 226	190 855	1 597 796	51 542
04	30	246 778	337 350	164 810	154 298	244 924	214 175	181 393	1 543 728	51 458
05	31	244 971	351 652	173 484	160 128	246 257	221 475	190 836	1 588 803	51 252
06	30	221 376	342 514	166 101	159 990	234 202	216 104	183 956	1 524 243	50 808
07	31	228 915	365 264	180 174	165 153	253 798	232 732	199 754	1 625 790	52 445
08	31	215 117	363 927	172 616	152 720	243 859	233 691	192 358	1 574 288	50 783
09	30	226 458	351 964	174 676	164 380	252 063	227 071	198 238	1 594 850	53 162
10	31	253 079	356 040	171 110	181 662	259 088	228 510	196 834	1 646 323	53 107
11	30	246 068	341 627	166 306	170 731	253 985	223 750	190 326	1 592 793	53 093
12	31	257 571	348 492	152 796	180 852	260 338	230 818	182 108	1 612 975	52 031
TMDA	365	7 827	11 398	5 518	5 344	8 157	7 336	6 179	51 758	

Tabela 93 - TMDA das Vias do Sublanço 8 em 2009

Sublanço 9/2009							
mês	dias	N1	N2	S1	S2	Total	TMD
01	31	470 635	344 612	519 786	288 046	1 623 079	52 357
02	28	420 180	308 389	463 940	257 994	1 450 503	51 804
03	31	474 880	353 304	524 603	299 577	1 652 364	53 302
04	30	457 637	337 947	501 026	285 481	1 582 091	52 736
05	31	475 808	352 051	522 275	292 372	1 642 506	52 984
06	30	456 977	336 445	503 590	278 486	1 575 498	52 517
07	31	486 862	361 244	538 148	301 478	1 687 732	54 443
08	31	478 448	351 425	524 444	284 184	1 638 501	52 855
09	30	472 910	351 457	523 424	300 176	1 647 967	54 932
10	31	477 625	362 801	548 360	311 451	1 700 237	54 846
11	30	466 842	351 584	531 564	303 222	1 653 212	55 107
12	31	470 985	332 674	546 811	291 934	1 642 404	52 981
TMDA	365	15 369	11 353	17 118	9 574	53 414	

Tabela 94 - TMDA das Vias do Sublanço 9 em 2009

Sublanço 8/2010										
mês	dias	N1	N2	N3	S1	S2	S3	S4	Total	TMD
01	31	234 081	328 929	161 856	168 189	238 710	215 694	180 383	1 527 842	49 285
02	28	222 440	290 989	133 678	145 587	219 931	195 070	152 356	1 360 051	48 573
03	31	265 244	345 722	173 243	178 444	264 264	231 237	196 029	1 654 183	53 361
04	30	241 134	343 877	164 181	171 662	254 881	219 521	186 162	1 581 418	52 714
05	31	249 833	359 557	173 414	177 088	264 376	229 320	196 785	1 650 373	53 238
06	30	235 009	351 358	167 499	170 348	252 778	220 857	188 823	1 586 672	52 889
07	31	238 804	364 984	180 612	167 933	270 178	237 041	204 876	1 664 428	53 691
08	31	206 853	311 894	162 411	167 577	249 673	232 228	203 823	1 534 459	49 499
09	30	220 916	338 991	175 025	172 098	245 245	228 228	211 161	1 591 664	53 055
10	31	227 801	366 274	182 813	171 694	234 948	227 717	209 892	1 621 139	52 295
11	30	232 688	343 976	172 080	171 766	241 027	221 405	196 221	1 579 163	52 639
12	31	259 644	347 564	159 354	179 430	263 221	234 354	190 371	1 633 938	52 708
TMDA	365	7 766	11 217	5 496	5 594	8 217	7 377	6 348	52 015	

Tabela 95 - TMDA das Vias do Sublanço 8 em 2010

Sublanço 9/2010							
mês	dias	N1	N2	S1	S2	Total	TMD
01	31	443 609	335 874	511 876	284 376	1 575 735	50 830
02	28	402 058	313 758	480 759	258 694	1 455 269	51 974
03	31	473 742	385 414	560 182	336 492	1 755 830	56 640
04	30	458 850	358 216	535 900	306 221	1 659 187	55 306
05	31	475 597	377 476	552 362	321 702	1 727 137	55 714
06	30	455 571	363 889	528 426	307 460	1 655 346	55 178
07	31	496 013	402 228	560 932	332 197	1 791 370	57 786
08	31	466 064	374 696	537 286	298 392	1 676 438	54 079
09	30	459 473	387 758	538 015	313 897	1 699 143	56 638
10	31	447 184	375 719	539 387	302 628	1 664 918	53 707
11	30	444 071	362 793	525 897	300 683	1 633 444	54 448
12	31	481 357	356 471	552 981	303 849	1 694 658	54 666
TMDA	365	15 078	12 039	17 600	10 045	54 763	

Tabela 96 - TMDA das Vias do Sublanço 9 em 2010

Sublanço 8/2011										
mês	dias	N1	N2	N3	S1	S2	S3	S4	Total	TMD
01	31	243 027	354 363	171 767	172 091	245 960	227 003	198 779	1 612 990	52 032
02	28	219 100	320 986	157 504	158 323	224 259	201 242	185 570	1 466 984	52 392
03	31	236 490	356 451	169 916	174 208	250 388	222 323	200 173	1 609 949	51 934
04	30	215 805	339 443	151 142	155 243	237 560	212 555	183 436	1 495 184	49 839
05	31	237 086	363 504	170 221	174 739	262 042	224 460	198 996	1 631 048	52 614
06	30	228 569	356 538	163 845	165 637	254 496	221 598	191 592	1 582 275	52 743
07	31	232 401	370 016	169 426	154 308	263 031	242 375	202 952	1 634 509	52 726
08	31	223 277	368 745	168 541	150 962	256 996	243 180	198 626	1 610 327	51 946
09	30	231 050	355 163	167 745	160 741	255 119	233 019	195 261	1 598 098	53 270
10	31	234 123	349 893	159 704	166 145	252 937	227 335	186 187	1 576 324	50 849
11	30	230 561	329 573	153 315	156 143	247 327	217 061	179 530	1 513 510	50 450
12	31	244 341	348 789	147 918	167 447	263 888	229 509	180 474	1 582 366	51 044
TMDA	365	7 605	11 544	5 345	5 359	8 258	7 402	6 306	51 818	

Tabela 97 - TMDA das Vias do Sublanço 8 em 2011

Sublanço 9/2011							
mês	dias	N1	N2	S1	S2	Total	TMD
01	31	344 140	269 556	403 784	226 635	1 244 115	40 133
02	28	409 176	333 914	485 303	282 502	1 510 895	53 961
03	31	457 441	365 532	540 935	309 040	1 672 948	53 966
04	30	437 053	335 915	514 039	281 705	1 568 712	52 290
05	31	467 839	373 587	551 692	317 813	1 710 931	55 191
06	30	458 770	359 490	537 725	305 427	1 661 412	55 380
07	31	479 897	374 128	569 724	330 267	1 754 016	56 581
08	31	471 694	367 098	560 996	315 712	1 715 500	55 339
09	30	461 966	367 674	545 345	313 851	1 688 836	56 295
10	31	460 836	357 398	542 211	297 520	1 657 965	53 483
11	30	446 399	346 971	520 290	293 406	1 607 066	53 569
12	31	471 353	344 059	541 424	294 917	1 651 753	53 282
TMDA	365	14 703	11 494	17 297	9 778	53 272	

Tabela 98 - TMDA das Vias do Sublanço 9 em 2011

Sublanço 8/2015										
mês	dias	N1	N2	N3	S1	S2	S3	S4	Total	TMD
01	31	244 029	324 047	145 594	168 046	154 624	299 291	169 973	1 505 604	48 568
02	28	206 693	298 513	127 333	156 010	132 051	270 902	150 548	1 342 050	47 930
03	31	229 576	337 243	144 460	171 275	151 622	302 487	171 082	1 507 745	48 637
04	30	221 371	335 294	144 469	169 786	149 151	288 157	166 505	1 474 733	49 158
05	31	227 474	345 670	149 216	166 996	155 078	302 295	177 903	1 524 632	49 182
06	30	222 501	342 631	149 170	168 572	151 505	302 213	179 108	1 515 700	50 523
07	31	228 532	361 449	158 862	171 547	142 979	324 203	201 323	1 588 895	51 255
08	31	209 847	358 807	157 100	157 968	147 632	319 701	186 212	1 537 267	49 589
09	30	226 604	344 276	151 691	171 064	147 187	315 346	183 155	1 539 323	51 311
10	31	241 448	338 205	151 622	178 979	146 438	321 133	181 621	1 559 446	50 305
11	30	233 802	330 711	148 188	173 173	143 438	311 690	180 989	1 521 991	50 733
12	31	247 636	349 702	150 397	184 826	154 014	332 099	184 950	1 603 624	51 730
TMDA	365	7 506	11 141	4 872	5 584	4 865	10 108	5 845	49 921	

Tabela 99 - TMDA das Vias do Sublanço 8 em 2015

Sublanço 9/2011							
mês	dias	N1	N2	S1	S2	Total	TMD
01	31	445 211	336 524	512 165	270 699	1 564 599	50 471
02	28	394 692	303 840	458 387	243 497	1 400 416	50 015
03	31	435 497	338 979	517 139	274 640	1 566 255	50 524
04	30	420 550	336 419	501 097	264 315	1 522 381	50 746
05	31	448 568	348 158	518 876	276 732	1 592 334	51 366
06	30	439 762	347 139	510 993	278 591	1 576 485	52 550
07	31	469 638	367 223	540 422	296 285	1 673 568	53 986
08	31	457 799	346 634	523 675	282 524	1 610 632	51 956
09	30	450 796	350 003	518 357	284 692	1 603 848	53 462
10	31	456 987	353 452	528 347	284 325	1 623 111	52 358
11	30	444 873	348 223	512 183	282 855	1 588 134	52 938
12	31	468 604	357 125	536 154	293 011	1 654 894	53 384
TMDA	365	14 611	11 325	16 925	9 129	51 991	

Tabela 100 - TMDA das Vias do Sublanço 9 em 2015

ANEXO 2

ADR		TMDA															
Ano		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Dias Fevereiro		28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28
jan/02	31		26 503	28 468	30 521	30 677	31 219	32 304	32 035	32 313	31 559	29 777	27 985	28 042	28 683	30 009	31 579
fev/02			26 471	28 345	29 645	30 344	30 995	31 599	31 286	29 628	31 698	28 835	27 326	27 931	28 284	29 552	31 147
mar/02	31		26 658	29 203	30 299	31 588	31 862	31 739	32 247	32 590	31 471	29 329	26 516	28 050	28 931	30 237	32 296
abr/02	30		26 960	29 674	31 081	30 718	31 750	32 106	32 636	32 781	31 125	28 347	28 496	28 429	29 368	30 975	32 105
mai/02	31		27 647	29 792	31 067	31 794	32 290	32 116	32 767	33 225	32 365	29 402	28 924	29 289	29 736	31 440	33 193
jun/02	30	26 258	27 947	29 841	31 989	31 500	32 424	32 122	32 915	33 068	32 883	29 439	28 998	29 298	30 563	32 108	33 961
jul/02	31	27 555	28 997	31 241	32 793	32 998	34 452	33 701	34 780	34 855	34 009	31 084	30 545	30 814	32 225	33 335	35 324
ago/02	31	28 181	29 141	31 696	33 516	33 657	34 627	33 279	34 811	34 670	34 495	31 444	31 191	31 801	32 396	33 393	
set/02	30	27 323	29 068	32 194	32 976	32 824	33 458	32 945	34 108	34 448	33 678	29 882	30 125	30 394	31 333	32 876	
out/02	31	26 589	28 382	31 003	30 942	31 254	32 598	32 364	32 791	32 562	31 151	28 149	29 032	29 154	29 783	31 061	
nov/02	30	25 759	27 577	30 023	30 580	30 580	31 758	31 441	32 284	31 799	29 993	27 032	28 098	27 902	29 703	30 687	
dez/02	31	26 240	28 418	30 165	30 680	31 170	32 283	31 901	32 023	32 072	30 523	28 528	28 818	29 091	30 616	31 477	
TMDA"		26 849	27 824	30 144	31 351	31 604	32 490	32 307	32 902	32 859	32 084	29 279	28 849	29 195	30 149	31 437	32 822

Tabela 101 – TMDA na consessão da VIALITORAL em anos passados

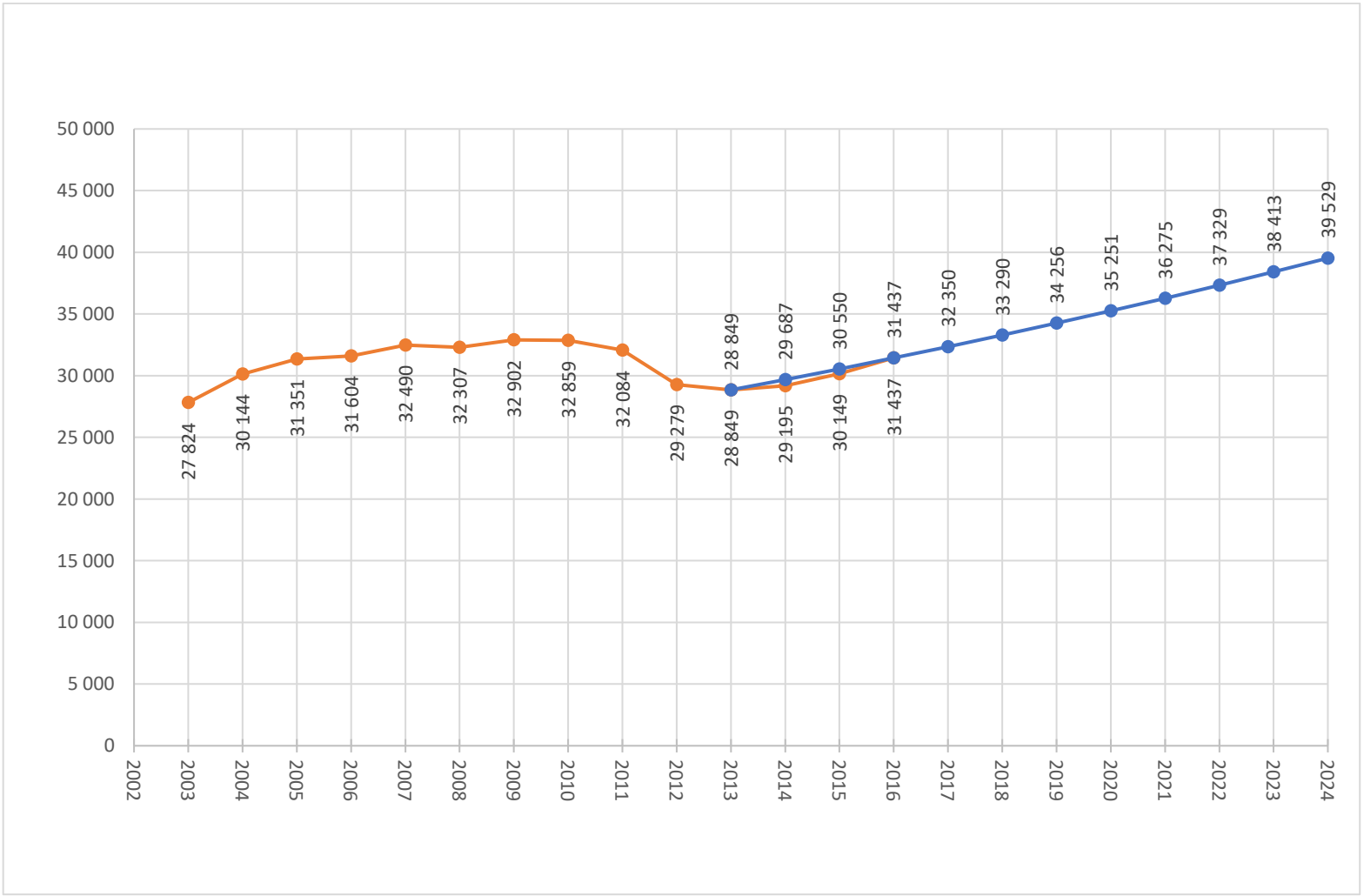


Gráfico 17 – Variação do TMDA ao longo dos anos

ANEXO 3

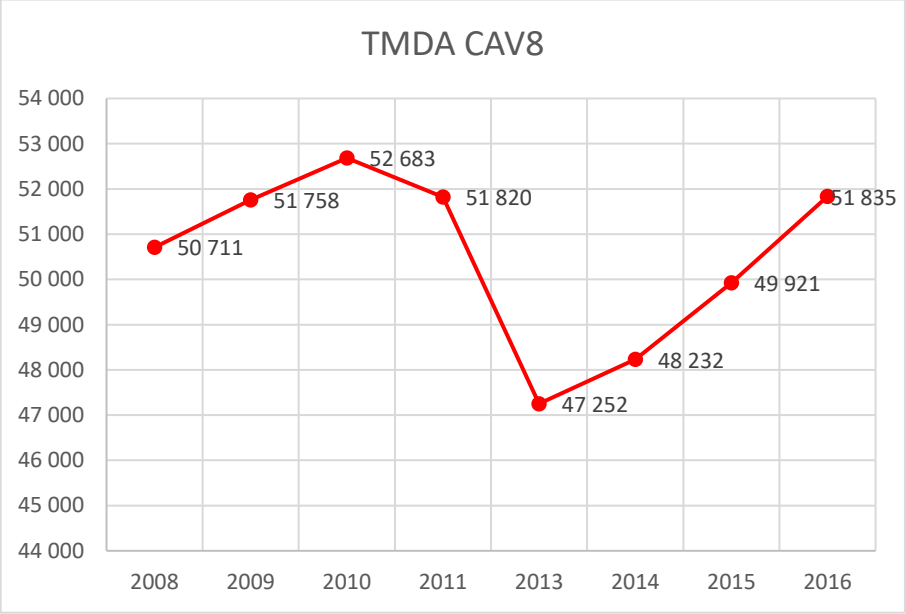


Gráfico 18 – Variação do TMDA no sublanço 8 ao longo dos anos passados

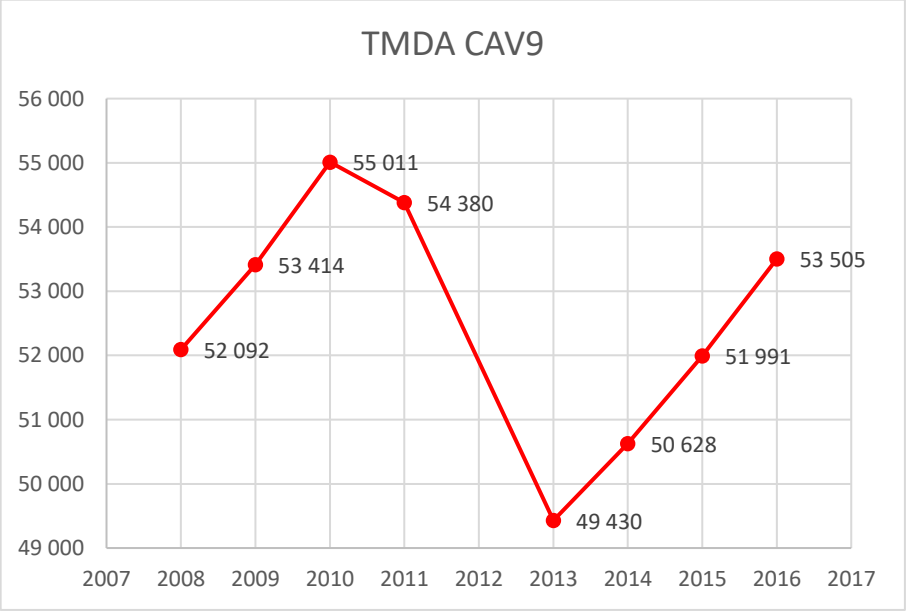


Gráfico 19 - Variação do TMDA no sublanço 9 ao longo dos anos passados

ANEXO V

CARACTERIZAÇÃO DO PAVIMENTO

AV.1. Observação visual e apoio fotográfico

Figura 57 – Vista da ER 115, VR1-Rotunda D. Francisco Santana

Figura 58 – Vista da ER 115, Rotunda D. Francisco Santana-VR1

Figura 59 –Pele de crocodilo – Grau de severidade baixo (pk ≈ 0+240)

Figura 60 – Pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+240)

Figura 61 – Fissura longitudinal evoluindo para pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+200)

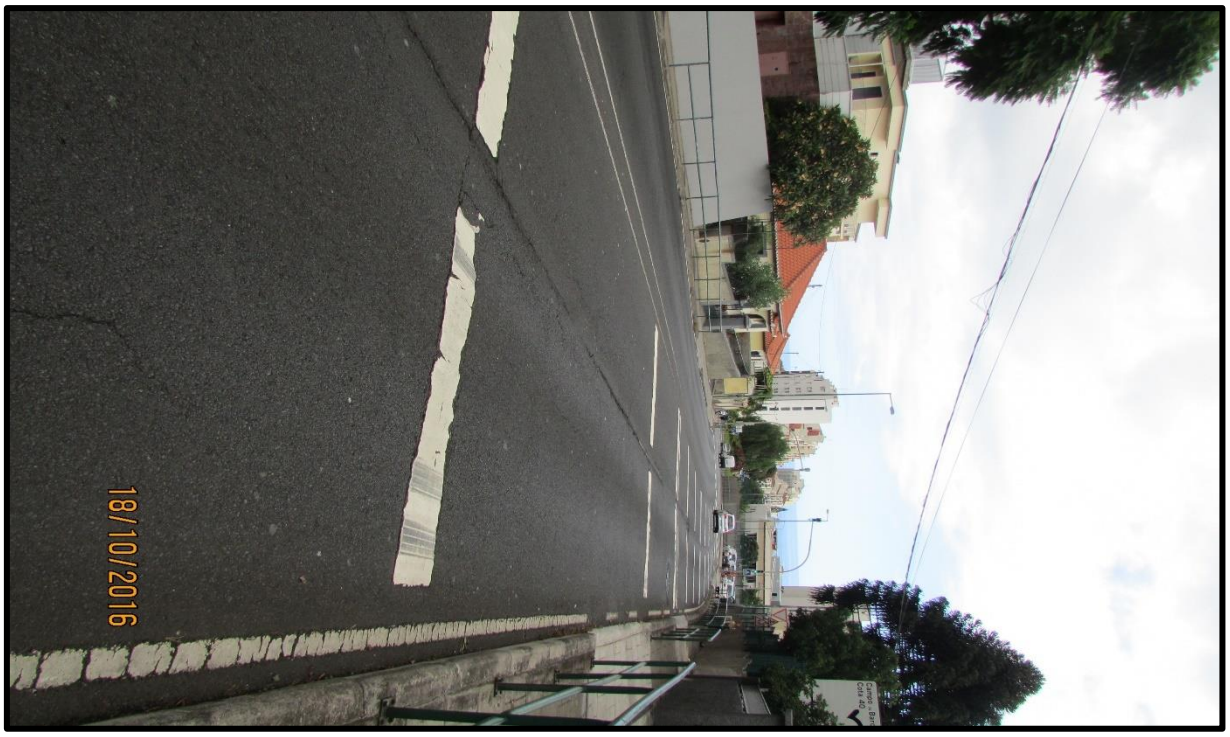


Figura 62 - – Fissura longitudinal– Grau de severidade médio (pk ≈ 0+150)

Figura 63 – Pele de crocodilo evoluindo para ninhos – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+140)

Figura 64 – Pele de crocodilo e depressão – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+140)

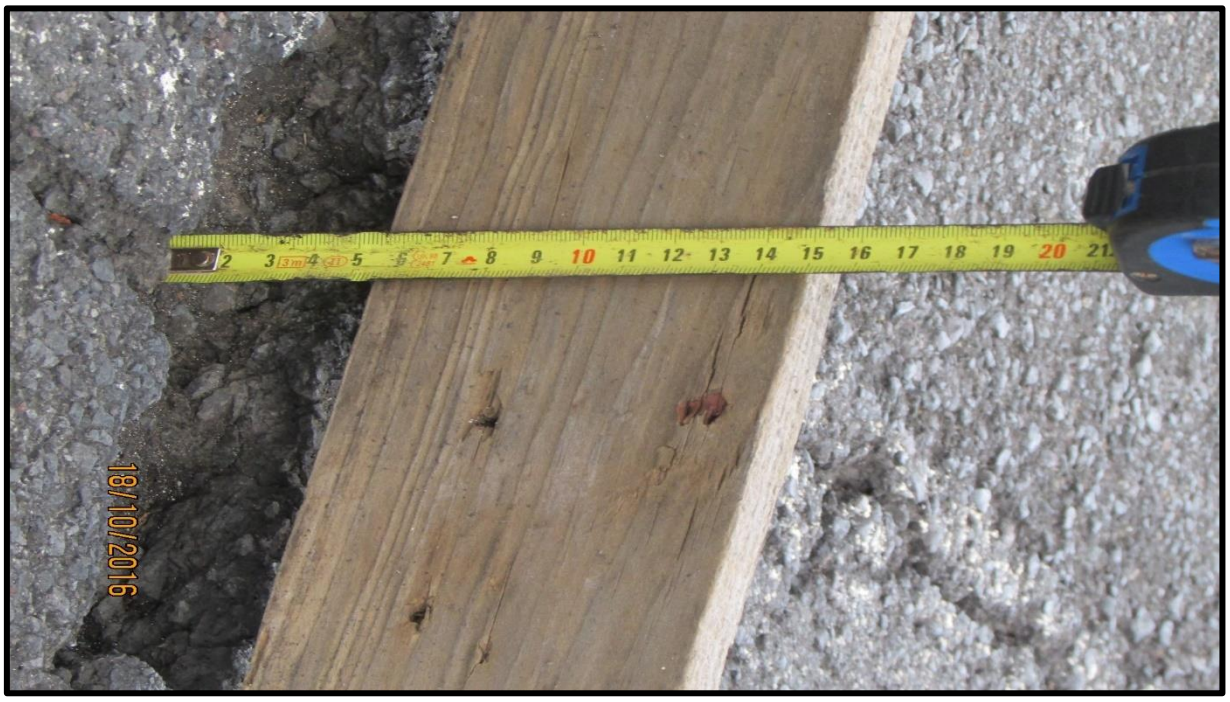


Figura 65 – Ninhos – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+140)

Figura 66 – Pele de crocodilo e depressões – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+70)

Figura 67 – Pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+70)

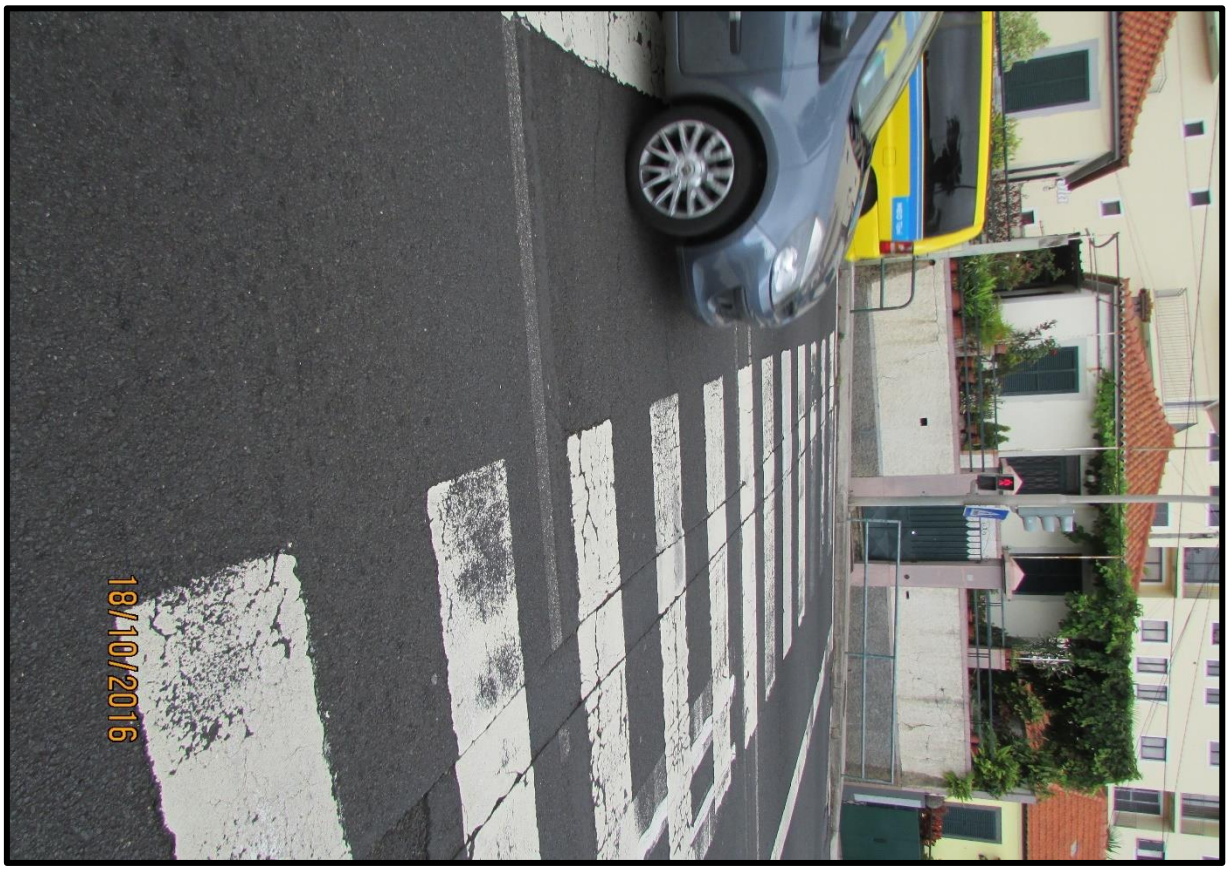


Figura 68 – Fissuras tranversais – Grau de severidade médio (pk ≈ 0+60)

Figura 69 – Fissuras transversais evoluindo para pele de crocodilo – Grau de severidade baixo (pk ≈ 0+60)

Figura 70 – Pele de crocodilo – Grau de severidade baixo (pk ≈ 0+55)

Figura 71 – Fissuras transversais – Grau de severidade baixo (pk ≈ 0+45)

Figura 72 – Fissuras longitodinais -Grau de severidade médio (pk ≈ 0+30)

Figura 73 – Desagregações superficiais – Grau de severidade baixo (pk ≈ 0+20)

Figura 74 – Desagregações superficiais – Grau de severidade baixo (pk ≈ 0+10)

Figura 75 – Pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+10)

Figura 76 – Pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+5)

Figura 77 – Pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+10)

Figura 78 – Pele de crocodilo – Grau de severidade médio (pk ≈ 0+20)

Figura 79 – Pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+30)

Figura 80 – Pele de crocodilo e depessão – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+40)

Figura 81 – Pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+50)

Figura 82 – Pele de crocodilo – Grau de severidade baixo (pk ≈ 0+60)

Figura 83 – Fissuras longitudinais evoluídas em pele de crocodilo – Grau de severidade alto (pk ≈ 0+100)

Figura 84 – Fissuras longitudinais – Grau de severidade médio (pk ≈ 0+200)

AV.2. Ensaios de carga com Deflectómetro de Impacto

Consultar"																														
	Nome do Ficheiro:		C:\Users\sousa\Desktop\Vialitoral_IV_2016\FWD\SC3\EDUARTE.F25																										
	Força de Normalização:		65 kN																										
	Pancada a normalizar:		1																										
	Raio da placa:		0,15 m																										
Estação	Latitude	Longitude	Alt.	T.S.	T.A.	T.P.		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	Médias:					Máximos:					Normalizados			T.F.
																	D1	D2	D3	D5	D9	D1	D2	D3	D5	D9	D1	D2	D3	D5	D9	
0,000	0,0000	6,0000	7	23,0	22,0	21,0	0,0	426	342	303	263	199	149	110	83	69	-70	17	57	36	496	286	142	33	483,48	224,72	86,21	36,01	1
0,025	0,0000	7,0000	3	22,9	22,0	21,0	0,0	645	493	418	340	210	145	100	72	54	149	132	68	21	0,308	0,586	0,793	0,591						
0,050	0,0000	4,0000	3	22,8	22,0	21,0	0,0	416	314	223	176	117	77	53	37	29	-80	-63	-25	-4	-0,165	-0,282	-0,292	-0,107						
0,075	0,0000	0,0000	7	22,9	22,0	21,0	0,0	242	187	162	136	96	64	43	29	23	-255	-124	-46	-10	-0,527	-0,550	-0,530	-0,270						
0,100	0,0000	0,0000	7	22,9	22,0	21,0	0,0	137	106	92	81	56	38	24	16	11	-359	-194	-96	-22	-0,742	-0,862	-0,996	-0,605						
0,125	0,0000	0,0000	7	23,1	22,0	21,0	0,0	620	433	330	247	137	87	65	49	36	124	44	-5	3	0,257	0,196	-0,062	0,086						
0,150	0,0000	3,0000	6	22,9	22,0	21,0	0,0	533	333	247	177	106	67	45	33	24	36	-39	-36	-9	0,075	-0,175	-0,420	-0,258						
0,175	0,0000	6,0000	7	22,6	22,0	21,0	0,0	268	197	166	133	86	52	29	16	10	-229	-120	-56	-23	-0,473	-0,534	-0,649	-0,640						
0,200	0,0000	6,0000	7	22,4	22,0	21,0	0,0	314	234	196	159	104	66	41	21	9	-162	-90	-38	-24	-0,376	-0,388	-0,493	-0,685						
0,225	0,0000	0,0000	0	22,3	22,0	21,0	0,0	520	395	310	242	150	93	61	41	29	23	24	8	-3	0,048	0,109	0,097	-0,092						
0,250	0,0000	3,0000	3	22,1	22,0	21,0	0,0	824	594	459	352	211	121	74	53	41	328	173	69	8	0,678	0,769	0,795	0,220						
0,275	0,0000	3,0000	3	22,3	22,0	21,0	0,0	980	686	511	385	228	132	81	57	45	483	225	86	12	1,000	1,000	1,000	0,329						
0,300	0,0000	3,0000	3	22,0	22,0	21,0	0,0	677	454	351	259	147	85	56	45	39	181	65	5	6	0,374	0,288	0,059	0,171						
0,325	0,0000	3,0000	3	22,0	22,0	21,0	0,0	428	325	267	212	132	83	55	40	34	-68	-19	-10	1	-0,141	-0,085	-0,116	0,040						
0,350	0,0000	3,0000	4	21,5	22,0	21,0	0,0	362	251	209	168	118	81	63	49	41	-184	-77	-24	8	-0,277	-0,343	-0,281	0,216						
0,370	0,0000	7,0000	0	21,1	22,0	21,0	0,0	548	403	332	268	174	112	73	45	32	52	46	32	-1	0,107	0,206	0,374	-0,016						

Títulos:	Deflexões:		#REF!													Títulos:	DD1	Desvios acumulados de Dl1												
	Temperaturas:		Evolução das Temperaturas do Ar, do pavimento à superfície e à prof. de 25 cm														DD2	Desvios acumulados de Dl3												
	Código:		Evolução da Classe de Fendilhamento (AASHO)														DD3	Desvios acumulados de Dl5												
	Eixo X:		Distâncias [Km]														DD4	Desvios acumulados de Dl9												
																		Eixo X:	Desvios											

Tabela 102 – Deflexões *in situ* registadas no trecho auscultado, sentido ascendente

Consulpar",""",""","														", "", ""	62.100 / 65.600										
	Nome do Ficheiro:		C:\Users\rsousa\Desktop\Vialitoral_IV_2016\FWD\SC9SDUARTE.F25																						
	Força de Normalização:		65	kN																					
	Pancada a normalizar:		1																						
	Raio da placa:		0,15	m														Médias:				Máximos:			
																	404	193	92	30	376,22	184,28	48,35	28,12	1
																					Normalizados				
Estação	Latitude	Longitude	Alt.	T.S.	T.A.	T.P.		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Df8	Df9	Da1	Da3	Da5	Da9	Da1	Da3	Da5	Da9	T.F.
0,000	0,0000	0,0000	6	22,5	22,0	21,0	0,0	463	332	247	137	80	46	29	20	18	59	54	-12	-12	0,156	0,295	-0,241	-0,425	
0,025	0,0000	0,0000	6	22,4	22,0	21,0	0,0	780	508	377	270	109	55	43	34	32	376	184	17	2	1,000	1,000	0,356	0,054	
0,050	0,0000	0,0000	6	21,8	22,0	21,0	0,0	521	346	265	199	115	68	45	33	21	118	72	24	-10	0,312	0,392	0,495	-0,345	
0,075	0,0000	0,0000	6	21,8	22,0	21,0	0,0	526	351	259	185	89	26	15	10	9	122	67	-2	-22	0,324	0,362	-0,051	-0,765	
0,100	0,0000	0,0000	6	22,8	22,0	21,0	0,0	483	345	240	177	62	32	17	10	9	79	47	-29	-21	0,211	0,254	-0,603	-0,763	
0,125	0,0000	7,0000	6	22,8	22,0	21,0	0,0	117	85	75	68	54	43	34	24	18	-287	-117	-37	-12	-0,763	-0,637	-0,765	-0,441	
0,150	0,0000	3,0000	0	21,8	22,0	21,0	0,0	241	152	121	99	83	71	66	60	51	-163	-72	-8	20	-0,432	-0,389	-0,167	0,726	
0,175	0,0000	4,0000	0	22,8	22,0	21,0	0,0	699	156	127	114	97	81	67	49	40	295	-65	6	9	0,783	-0,355	0,123	0,332	
0,200	0,0000	7,0000	3	22,8	22,0	21,0	0,0	242	191	179	164	140	116	94	73	58	-161	-14	48	28	-0,429	-0,074	1,000	1,000	
0,225	0,0000	7,0000	3	22,7	22,0	21,0	0,0	155	124	116	105	90	76	64	55	47	-249	-77	-1	16	-0,662	-0,416	-0,025	0,583	
0,247	0,0000	7,0000	3	23,0	22,0	21,0	0,0	216	128	113	103	86	68	53	41	32	-188	-80	-6	1	-0,500	-0,432	-0,121	0,045	
Títulos:	Deflexões:		#REF!								Títulos:	DD1	Desvios acumulados de Df1												
	Temperaturas:		Evolução das Temperaturas do Ar, do pavimento à superfície e à prof. de 25 cm									DD2	Desvios acumulados de Df3												
	Código:		Evolução da Classe de Fendilhamento (AASHO)									DD3	Desvios acumulados de Df5												
	Eixo X:		Distâncias [Km]									DD4	Desvios acumulados de Df9												
												Eixo X:	Desvios												

Tabela 103 - Deflexões *in situ* registadas no trecho auscultado, sentido descendente

ANÁLISE DAS DEFLEXÕES OBTIDAS COM O DEFLECTOMETRO DE IMPACTO_Sendito Ascendente

Estação	Latitude	Longitude	Alt.	T.S.	T.A.	T.P.		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Df8	Df9
0,000	0,0000	6,0000	7	23,0	22,0	21,0	0,0	426	342	303	263	199	149	110	83	69
0,025	0,0000	7,0000	3	22,9	22,0	21,0	0,0	645	499	418	340	210	145	100	72	54
0,050	0,0000	4,0000	3	22,8	22,0	21,0	0,0	416	314	223	176	117	77	53	37	29
0,075	0,0000	0,0000	7	22,9	22,0	21,0	0,0	242	187	162	136	96	64	43	29	23
0,100	0,0000	0,0000	7	22,9	22,0	21,0	0,0	137	106	92	81	56	38	24	16	11
0,125	0,0000	0,0000	7	23,1	22,0	21,0	0,0	620	433	330	247	137	87	65	49	36
0,150	0,0000	3,0000	6	22,9	22,0	21,0	0,0	533	333	247	177	106	67	45	33	24
0,175	0,0000	6,0000	7	22,6	22,0	21,0	0,0	268	197	166	133	86	52	29	16	10
0,200	0,0000	6,0000	7	22,4	22,0	21,0	0,0	314	234	196	159	104	66	41	21	9
0,225	0,0000	0,0000	0	22,3	22,0	21,0	0,0	520	395	310	242	150	93	61	41	29
0,250	0,0000	3,0000	3	22,1	22,0	21,0	0,0	824	594	459	352	211	121	74	53	41
0,275	0,0000	3,0000	3	22,3	22,0	21,0	0,0	980	686	511	385	228	132	81	57	45
							Média	473	338	275	209	127	82	57	39	29
							Desvio Padrão	247	172	128	97	57	37	27	21	18
							P85%	729	516	408	310	186	121	85	61	48

Tabela 104 – Análise das deflexões obtidas – sentido ascendente

ANÁLISE DAS DEFLEXÕES OBTIDAS COM O DEFLECTOMETRO DE IMPACTO _Sendito Descendente

Estação	Latitude	Longitude	Alt.	T.S.	T.A.	T.P.		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Df8	Df9
0,000	0,0000	0,0000	6	22,5	22,0	21,0	0,0	463	332	247	137	80	46	29	20	18
0,025	0,0000	0,0000	6	22,4	22,0	21,0	0,0	780	508	377	270	109	55	43	34	32
0,050	0,0000	0,0000	6	21,8	22,0	21,0	0,0	521	346	265	199	115	68	45	33	21
0,075	0,0000	0,0000	6	21,8	22,0	21,0	0,0	526	351	259	185	89	26	15	10	9
0,100	0,0000	0,0000	6	22,8	22,0	21,0	0,0	483	345	240	177	62	32	17	10	9
0,125	0,0000	7,0000	6	22,8	22,0	21,0	0,0	117	85	75	68	54	43	34	24	18
0,150	0,0000	3,0000	0	21,8	22,0	21,0	0,0	241	152	121	99	83	71	66	60	51
0,175	0,0000	4,0000	0	22,8	22,0	21,0	0,0	699	156	127	114	97	81	67	49	40
0,200	0,0000	7,0000	3	22,8	22,0	21,0	0,0	242	191	179	164	140	116	94	73	58
0,225	0,0000	7,0000	3	22,7	22,0	21,0	0,0	155	124	116	105	90	76	64	55	47
0,247	0,0000	7,0000	3	23,0	22,0	21,0	0,0	216	128	113	103	86	68	53	41	32
							Média	463	191	179	137	89	68	45	34	32
							Desvio Padrão	223,4049	134,6947	91,8687	58,15389	23,88186	25,41389	23,82238	20,70224	16,9748
							P85%	694,2109	330,7583	274,2989	196,8603	113,8043	94,27317	69,69014	55,12245	49,09858

Tabela 105 - Análise das deflexões obtidas – sentido descendente

Figura 85 - Equipamento FWD utilizado na caracterização estrutural do pavimento em estudo

Figura 86 – Foto ilustrativa do deflectómetro de impacto aplicando uma carga de 65 kN

Figura 87 - Foto ilustrativa do deflectómetro de impacto em andamento

AV.3. Plano de prospeção

AFAVIAS - Engenharia e Construções, S.A.
LABORATÓRIO

AFAVIAS

RELATÓRIO DE ENSAIO

Determinação da Espessura da Camada

Procedimento - Determinação das espessuras das Camadas, através da Medição de provetes retirados em Obra "Carotes"

Relatório nº.: *5 / 2017 / BE*

Idêntificação do Cliente

Designação da Obra: *Sondagens à rotação a realizar na Estrada da Liberdade* Cód: *SR VR1*

Data do Ensaio: *terça-feira, 24 de Janeiro de 2017*

Localização do Ensaio: *Estrada da Liberdade*

Nº do carote	Faixa	Via	Pk	Distância ao Eixo (m)	1ª Camada (cm)	2ª Camada (cm)	3ª Camada (cm)	Espessura Total (cm)
SR1	Norte	Dir	0+025	2	5,5			
SR2	Norte	Dir	0+250	2	5,5			
SR3	Sul	Dir	0+070	2	4,5			
SR4	Sul	Dir	0+220	2	3,5			

Observações:

As mediçoes são referentes apenas a camada solicitada, camada de desgaste.

Ensaiou: Luis Vieira

Este Relatório só pode ser reproduzido na Integra

Página1 de 1

O Coordenador do Laboratório

Mod.146.PN.LC.Rev.02

Câmara de Lobos, 1 Fevereiro 2017

Parque Empresarial da Zona Oeste - Lote 11 - Ribeira dos Socorridos; 9304-005 - Câmara de Lobos - Tel: 291 91 10 10

AFAVIAS - Engenharia e Construções, S.A.
LABORATÓRIO

RELATÓRIO DE ENSAIO

Determinação da percentagem de betume por Ignição
EN 12697-39 Binder content by ignition - Method A

Relatório nº.: *1440 / 2017 / BE*

Idêntificação do Cliente

Designação da Obra	*Sondagens à rotação a realizar na Estrada da Liberdade*	Cód:	*SR VR1*

Idêntificação da Amostra

Designação da Mistura:	*Carotagem em Obra*			
Data da Amostragem	*terça-feira, 24 de Janeiro de 2017*	Cód. Amostra/ID	*SR1*	*1512*
Local de Amostragem:	*Local de aplicação*	Tipo de Amostra		
Local de Aplicação:	*Estrada da Liberdade*			

Faixa:	*Norte*	Via:	*Dir*	Kilómetro (Pk)	*0+025*	Nº Camada:	*Desgaste*

Data do Ensaio:	*quinta-feira, 26 de Janeiro de 2017*

Idêntificação do Provete:	**SR1**
Massa inicial do provete (g):	985
Temperatura máxima ºC:	505,00
Massa final do provete (g):	931,1
Valor de Calibração - Método A3:	0,0
Percentagem de Betume:	**5,5**

Ensaiou: Luís Vieira

Este Relatório só pode ser reproduzido na íntegra

O Coordenador do Laboratório

Mod.96.PN.LC.Rev.02

Câmara de Lobos, 1 Fevereiro 2017

Parque Empresarial da Zona Oeste - Lote 11 - Ribeira dos Socorridos; 9304-005 - Câmara de Lobos - Tel: 291 91 10 10

AFAVIAS - Engenharia e Construções, S.A.
LABORATÓRIO

AFAVIAS

RELATÓRIO DE ENSAIO
Análise Granulométrica
EN 12697-2

Relatório nº.: *1394 / 2017 / BE*

Idêntificação do Cliente

Designação da Obra	*Sondagens à rotação a realizar na Estrada da Liberdade*	Cód:	*SR VR1*

Idêntificação da Amostra

Designação da Mistura:	*Carotagem em Obra*			
Data da Amostragem	*terça-feira, 24 de Janeiro de 2017*	Cód. Amostra/ID	*SR1*	*1512*
Local de Amostragem:	*Local de aplicação*	Tipo de Amostra		
Local de Aplicação:	*Estrada da Liberdade*			
Faixa: *Norte*	Via: *Dir*	Kilómetro (Pk) *0+025*	Nº Camada:	*Desgaste*

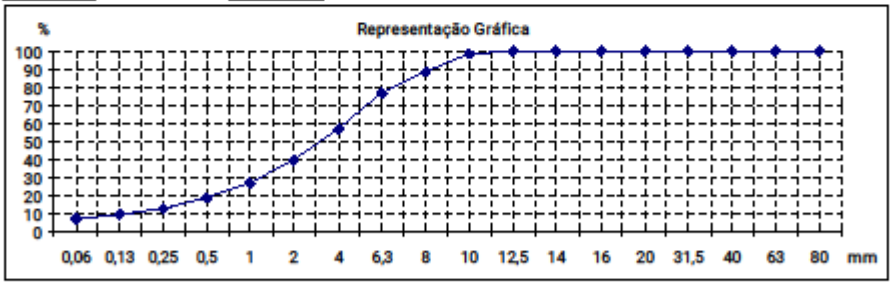
Data do Ensaio: *sexta-feira, 27 de Janeiro de 2017*

Série de Peneiros Utilizada: *Série Base + Série 2* Procedimento Utilizado *Via Húmida*

Peneiro - Malha (mm) *Percentagem acumulada de passados*

80 mm	100	8 mm	38
63 mm	100	6,3 mm	27
40 mm	100	4 mm	17
31,5 mm	100	2 mm	9
20 mm	100	1 mm	6
16 mm	100	0,500 mm	8
14 mm	100	0,250 mm	3
12,5 mm	100	0,125 mm	9
10 mm	98	0,063 mm	7.0

Massa seca total (g):	931,1
Massa seca após lavagem (g):	866,41
Massa seca dos finos lavados (g):	64,7
Massa total de Filer (g):	65,8
Resíduo (g):	1,13
Percentagem de finos Filer:	7,1
Erro do Ensaio (%):	-0,1
Massa real do provete ensaiado (g):	867,4



Ensaiou: Bruno Silveira

Este Relatório só pode ser reproduzido na Integra

O Coordenador do Laboratório

Mod.92.PN.LC.Rev.02

Câmara de Lobos, 1 Fevereiro 2017

Parque Empresarial da Zona Oeste - Lote 11 - Ribeira dos Socorridos; 9304-005 - Câmara de Lobos - Tel: 291 91 10 10

AFAVIAS - Engenharia e Construções, S.A.
LABORATÓRIO

RELATÓRIO DE ENSAIO

Determinação da percentagem de betume por Ignição
EN 12697-39 Binder content by ignition - Method A

Relatório nº.: *1441 / 2017 / BE*

Idêntificação do Cliente

Designação da Obra	*Sondagens à rotação a realizar na Estrada da Liberdade*	Cód:	*SR VR1*

Idêntificação da Amostra

Designação da Mistura:	*Carotagem em Obra*			
Data da Amostragem	*terça-feira, 24 de Janeiro de 2017*	Cód. Amostra/ID	*SR2*	*1513*
Local de Amostragem:	*Local de aplicação*	Tipo de Amostra		
Local de Aplicação:	*Estrada da Liberdade*			

Faixa:	*Norte*	Via:	*Dir*	Kilómetro (Pk)	*0+250*	Nº Camada:	*Desgaste*

Data do Ensaio:	*sexta-feira, 27 de Janeiro de 2017*

Idêntificação do Provete:	**SR2**
Massa inicial do provete (g):	734,5
Temperatura máxima ºC:	505,00
Massa final do provete (g):	696,2
Valor de Calibração - Método A3:	0,0
Percentagem de Betume:	**5,2**

Ensaiou: Luís Vieira

Este Relatório só pode ser reproduzido na íntegra

O Coordenador do Laboratório

Mod.96.PN.LC.Rev.02

Câmara de Lobos, 1 Fevereiro 2017

Parque Empresarial da Zona Oeste - Lote 11 - Ribeira dos Socorridos; 9304-005 - Câmara de Lobos - Tel: 291 91 10 10

AFAVIAS - Engenharia e Construções, S.A.
LABORATÓRIO

AFAVIAS

RELATÓRIO DE ENSAIO

Análise Granulométrica
EN 12697-2

Relatório nº.: *1395 / 2017 / BE*

Idêntificação do Cliente

Designação da Obra	*Sondagens à rotação a realizar na Estrada da Liberdade*	Cód:	*SR VR1*

Idêntificação da Amostra

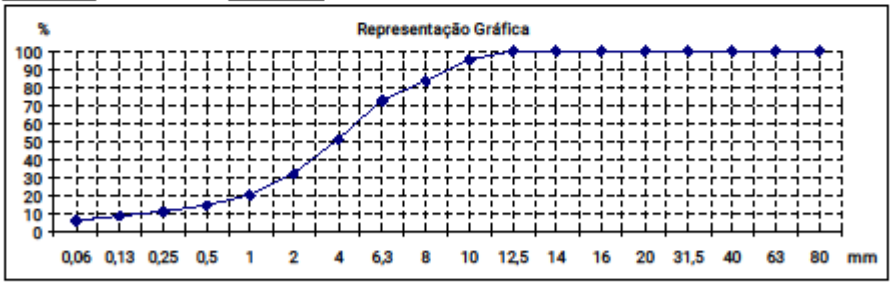
Designação da Mistura:	*Carotagem em Obra*			
Data da Amostragem	*terça-feira, 24 de Janeiro de 2017*	Cód. Amostra/ID	*SR2*	*1513*
Local de Amostragem:	*Local de aplicação*	Tipo de Amostra		
Local de Aplicação:	*Estrada da Liberdade*			
Faixa: *Norte*	Via: *Dir*	Kilómetro (Pk) *0+250*	Nº Camada:	*Desgaste*

Data do Ensaio:	*segunda-feira, 30 de Janeiro de 2017*
Série de Peneiros Utilizada: *Série Base + Série 2*	Procedimento Utilizado *Via Húmida*

Peneiro - Malha (mm) *Percentagem acumulada de passados*

80 mm	100	8 mm	33
63 mm	100	6,3 mm	72
40 mm	100	4 mm	51
31,5 mm	100	2 mm	31
20 mm	100	1 mm	20
16 mm	100	0,500 mm	15
14 mm	100	0,250 mm	11
12,5 mm	100	0,125 mm	8
10 mm	95	0,063 mm	6.0

Massa seca total (g):	*696,2*
Massa seca após lavagem (g):	*653,91*
Massa seca dos finos lavados (g):	*42,3*
Massa total de Filer (g):	*42,7*
Resíduo (g):	*0,38*
Percentagem de finos Filer:	*6,1*
Erro do Ensaio (%):	*-0,1*
Massa real do provete ensaiado (g):	*654,5*



Ensaiou: Renato Costa

Este Relatório só pode ser reproduzido na Integra

Página 1 de 1

O Coordenador do Laboratório

Mod.92.PN.LC.Rev.02

Câmara de Lobos, 1 Fevereiro 2017

Parque Empresarial da Zona Oeste - Lote 11 - Ribeira dos Socorridos; 9304-005 - Câmara de Lobos - Tel: 291 91 10 10

AFAVIAS - Engenharia e Construções, S.A.
LABORATÓRIO

RELATÓRIO DE ENSAIO

Determinação da percentagem de betume por Ignição
EN 12697-39 Binder content by ignition - Method A

Relatório nº.: *1442 / 2017 / BE*

Idêntificação do Cliente

Designação da Obra	*Sondagens à rotação a realizar na Estrada da Liberdade*	Cód:	*SR VR1*

Idêntificação da Amostra

Designação da Mistura:	*Carotagem em Obra*			
Data da Amostragem	*terça-feira, 24 de Janeiro de 2017*	Cód. Amostra/ID	*SR3*	*1514*
Local de Amostragem:	*Local de aplicação*	Tipo de Amostra		
Local de Aplicação:	*Estrada da Liberdade*			

Faixa:	*Sul*	Via:	*Dir*	Kilómetro (Pk)	*0+070*	Nº Camada:	*Desgaste*

Data do Ensaio:	*segunda-feira, 30 de Janeiro de 2017*

Idêntificação do Provete:	**SR3**
Massa inicial do provete (g):	750
Temperatura máxima ºC:	505,00
Massa final do provete (g):	709,1
Valor de Calibração - Método A3:	0,0
Percentagem de Betume:	**5,5**

Ensaiou: Marco Neto

Este Relatório só pode ser reproduzido na íntegra

O Coordenador do Laboratório

Mod.96.PN.LC.Rev.02

Câmara de Lobos, 1 Fevereiro 2017

Parque Empresarial da Zona Oeste - Lote 11 - Ribeira dos Socorridos; 9304-005 - Câmara de Lobos - Tel: 291 91 10 10

AFAVIAS - Engenharia e Construções, S.A.
LABORATÓRIO

AFAVIAS

RELATÓRIO DE ENSAIO
Análise Granulométrica
EN 12697-2

Relatório nº.: *1396 / 2017 / BE*

Idêntificação do Cliente

Designação da Obra: *Sondagens à rotação a realizar na Estrada da Liberdade* Cód: *SR VR1*

Idêntificação da Amostra

Designação da Mistura:	*Carotagem em Obra*			
Data da Amostragem	*terça-feira, 24 de Janeiro de 2017*	Cód. Amostra/ID	*SR3*	*1514*
Local de Amostragem:	*Local de aplicação*	Tipo de Amostra		

Local de Aplicação: *Estrada da Liberdade*

Faixa: *Sul* Via: *Dir* Kilómetro (Pk) *0+070* Nº Camada: *Desgaste*

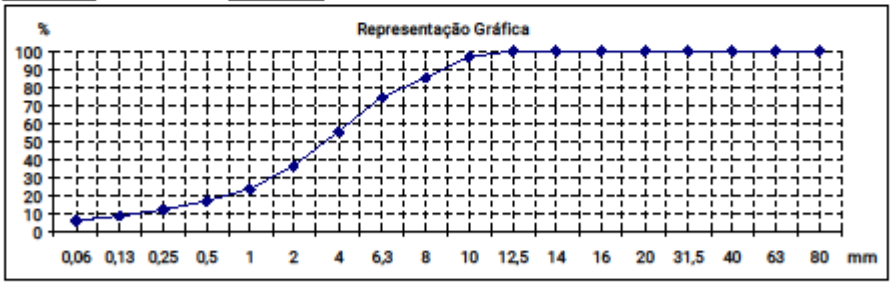
Data do Ensaio: *segunda-feira, 30 de Janeiro de 2017*

Série de Peneiros Utilizada: *Série Base + Série 2* Procedimento Utilizado *Via Húmida*

Peneiro - Malha (mm) *Percentagem acumulada de passados*

80 mm	100	8 mm	85
63 mm	100	6,3 mm	74
40 mm	100	4 mm	55
31,5 mm	100	2 mm	36
20 mm	100	1 mm	24
16 mm	100	0,500 mm	16
14 mm	100	0,250 mm	12
12,5 mm	100	0,125 mm	8
10 mm	96	0,063 mm	6,2

Massa seca total (g):	709,1
Massa seca após lavagem (g):	665,86
Massa seca dos finos lavados (g):	43,2
Massa total de Filer (g):	44,0
Resíduo (g):	0,77
Percentagem de finos Filer:	6,2
Erro do Ensaio (%):	0,0
Massa real do provete ensaiado (g):	665,6



Ensaiou:

Este Relatório só pode ser reproduzido na Integra

O Coordenador do Laboratório

Mod.92.PN.LC.Rev.02

Câmara de Lobos, 1 Fevereiro 2017

Parque Empresarial da Zona Oeste - Lote 11 - Ribeira dos Socorridos; 9304-005 - Câmara de Lobos - Tel: 291 91 10 10

AFAVIAS - Engenharia e Construções, S.A.
LABORATÓRIO

RELATÓRIO DE ENSAIO

Determinação da percentagem de betume por Ignição
EN 12697-39 Binder content by ignition - Method A

Relatório nº.: *1443 / 2017 / BE*

Idêntificação do Cliente

Designação da Obra	*Sondagens à rotação a realizar na Estrada da Liberdade*	Cód:	*SR VR1*

Idêntificação da Amostra

Designação da Mistura:	*Carotagem em Obra*			
Data da Amostragem	*terça-feira, 24 de Janeiro de 2017*	Cód. Amostra/ID	*SR4*	*1515*
Local de Amostragem:	*Local de aplicação*	Tipo de Amostra		
Local de Aplicação:	*Estrada da Liberdade*			

Faixa:	*Sul*	Via:	*Dir*	Kilómetro (Pk)	*0+220*	Nº Camada:	*Desgaste*

Data do Ensaio:	*terça-feira, 31 de Janeiro de 2017*

Idêntificação do Provete:	**SR4**
Massa inicial do provete (g):	574,9
Temperatura máxima ºC:	505,00
Massa final do provete (g):	545,5
Valor de Calibração - Método A3:	0,0
Percentagem de Betume:	**5,1**

Ensaiou: Renato Costa

Este Relatório só pode ser reproduzido na íntegra

O Coordenador do Laboratório

Mod.96.PN.LC.Rev.02

Câmara de Lobos, 1 Fevereiro 2017

Parque Empresarial da Zona Oeste - Lote 11 - Ribeira dos Socorridos; 9304-005 - Câmara de Lobos - Tel: 291 91 10 10

AFAVIAS - Engenharia e Construções, S.A.
LABORATÓRIO

AFAVIAS

RELATÓRIO DE ENSAIO

Análise Granulométrica
EN 12697-2

Relatório nº.: *1397 / 2017 / BE*

Idêntificação do Cliente

Designação da Obra	*Sondagens à rotação a realizar na Estrada da Liberdade*	Cód:	*SR VR1*

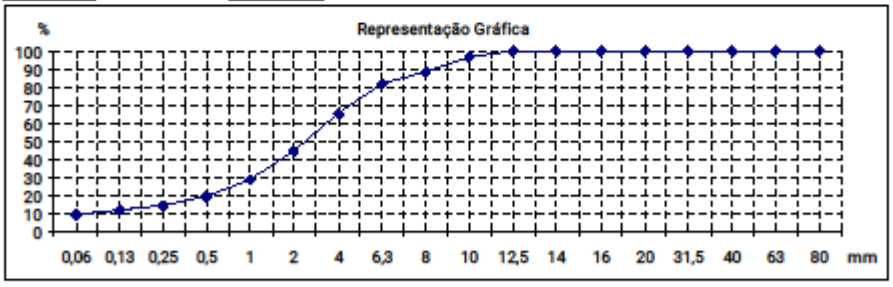
Idêntificação da Amostra

Designação da Mistura:	*Carotagem em Obra*			
Data da Amostragem	*terça-feira, 24 de Janeiro de 2017*	Cód. Amostra/ID	*SR4*	*1515*
Local de Amostragem:	*Local de aplicação*	Tipo de Amostra		
Local de Aplicação:	*Estrada da Liberdade*			
Faixa: *Sul*	Via: *Dir*	Kilómetro (Pk) *0+220*	Nº Camada:	*Desgaste*

Data do Ensaio:	*quarta-feira, 1 de Fevereiro de 2017*
Série de Peneiros Utilizada: *Série Base + Série 2*	Procedimento Utilizado *Via Húmida*

Peneiro - Malha (mm) *Percentagem acumulada de passados*

80 mm	100	8 mm	88	Massa seca total (g):	545,5
63 mm	100	6,3 mm	81	Massa seca após lavagem (g):	495,07
40 mm	100	4 mm	65	Massa seca dos finos lavados (g):	50,4
31,5 mm	100	2 mm	44	Massa total de Filer (g):	50,7
20 mm	100	1 mm	28	Resíduo (g):	0,3
16 mm	100	0,500 mm	19	Percentagem de finos Filer:	9,3
14 mm	100	0,250 mm	15	Erro do Ensaio (%):	0,0
12,5 mm	100	0,125 mm	12	Massa real do provete ensaiado (g):	495,3
10 mm	97	0,063 mm	9,3		



Ensaiou: Renato Costa

Este Relatório só pode ser reproduzido na Integra

Página 1 de 1

O Coordenador do Laboratório

Mod.92.PN.LC.Rev.02

Câmara de Lobos, 1 Fevereiro 2017

Parque Empresarial da Zona Oeste - Lote 11 - Ribeira dos Socorridos; 9304-005 - Câmara de Lobos - Tel: 291 91 10 10

Figura 88 – Carotes retirados das sondagensa à rotação elaboradas no troço auscultado

Figura 89 – Determinação da espessura das camadas dos carotes designados por SR1 e SR2

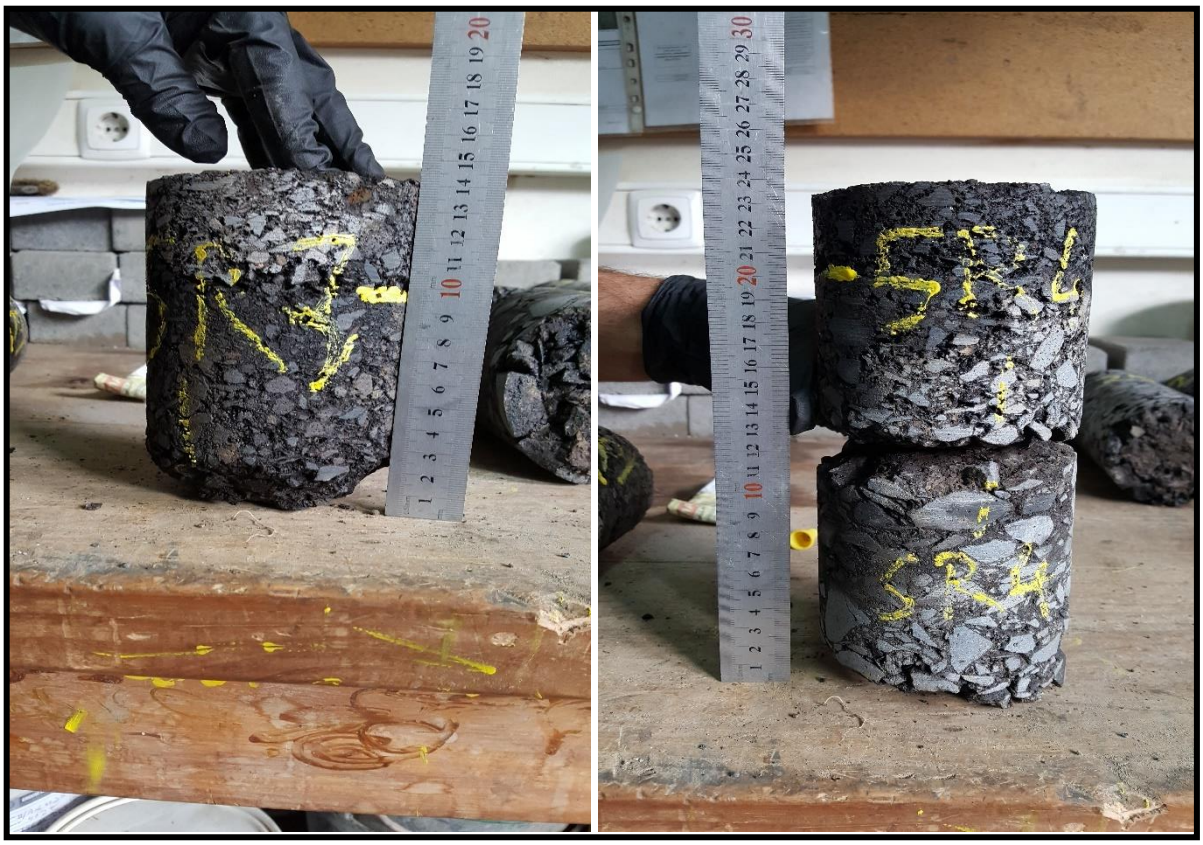


Figura 90 - Determinação da espessura das camadas dos carotes designados por SR3 e SR4

Figura 91 – Determinação da percentagem de betume em cada carote retirado

AV.4. Determinação dos módulos de deformabilidade

```
MODCOMP5 Pavement Modulus Back-Calculation Program
Version 5.0  Release E   (4 October 1999 )
(C) Copyright Cornell Local Roads Program 1993-1999
(C) Copyright Cornell University 1993-1999
All Rights Reserved

Data File: C:\MODCOMP5\OUTPUT\SR1.DAT
Processed: Feb. 20, 2017 @ 16:00 hrs


 Sentido Ascendente/SR1

                    Summary of Results for Each Iteration
                    -------------------------------------

                    (thicknesses in meters, moduli in MPa)

   Thickness:   .050       .200       .400       1.000      Infinite

 Using Model:    0          0          0          0          0

 Seed Moduli:   1000.0     7000.0     100.0      55.0      3500.0

 Itn  RMS Err    E1         E2         E3         E4         E5
  1    34.67    1000.0 F   2340.0 L   100.0 F    26.5 L    499.0 L
  2     6.58    1000.0 F   1800.0 L   100.0 F    75.3 L    131.0 L
  3     4.65    1000.0 F   2200.0 L   100.0 F    63.6 L    141.0 L
  4     4.64    1000.0 F   2180.0 L   100.0 F    63.6 L    141.0 L

                L -> linear model for this layer
                F -> modulus for this layer has a fixed value

Elapsed time:  0:00:00      (      .2 sec. )

Computation terminated because deflection match was
 within tolerance after  4 iterations.

Warning:  Solution is not acceptable because RMS error is too large.
```

5000

250

400

1000

```
MODCOMP5 Pavement Modulus Back-Calculation Program
Version 5.0  Release 2    (4 October 1999 )
(C) Copyright Cornell Local Roads Program 1993-1999
(C) Copyright Cornell University 1993-1999
All Rights Reserved

Data File: C:\MODCOMP5\OUTPUT\SR2.DAT
Processed: Feb. 20, 2017 @ 15:50 hrs


 Section Ascenderle/SR2

                    Summary of Results for Each Iteration
                    -------------------------------------

                    (thicknesses in meters, moduli in MPa)

   Thickness:    .050        .200        .400       1.000      Infinite

  Using Model:     3           0           0          3           0

  Seed Moduli:   1000.0      7000.0      100.0       55.0      3500.0

  Itn  RMS Err     E1          E2          E3          E4          E5
   1     38.05   1000.0 F    700.0 L     100.0 F     25.8 L     538.0 L
   2      6.58   1000.0 F   1000.0 L     100.0 F     50.5 L     181.0 L
   3      7.79   1000.0 F   1030.0 L     100.0 F     50.6 L     170.0 L

                  L -> linear model for this layer
                  F -> modulus for this layer has a fixed value

Elapsed Time:  0:00:00      (      .2 sec. )

Computation terminated because deflection match was
 within tolerance after  3 iterations.

Warning:  Solution is not acceptable because RMS error is too large.
```

```
MODCOMP5 Pavement Modulus Back-Calculation Program
Version 5.0  Release E   (4 October 1999 )
(C) Copyright Cornell Local Roads Program 1993-1999
(C) Copyright Cornell University 1993-1999
All Rights Reserved

Data File: C:\MODCOMP5\OUTPUT\SR3.DAT
Processed: Feb. 23, 2017 @ 17:37 hrs


 Sentido Descendente/SR3

                   Summary of Results for Each Iteration
                   -------------------------------------

                   (thicknesses in meters, moduli in MPa)

   Thickness:    .245        .400        .400      Infinite

 Using Model:      0           0           0           0

 Seed Moduli:    7000.0      300.0        55.0      3500.0

 Itn  RMS Err     E1          E2          E3          E4
  1     45.38     700.0 L     300.0 F      55.0 F     350.0 L
  2     58.44     586.0 L     300.0 F      55.0 F     182.0 L
  3     57.91     574.0 L     300.0 F      55.0 F     184.0 L

                L -> linear model for this layer
                F -> modulus for this layer has a fixed value

Elapsed time:  0:00:00      (      .1 sec. )

Computation terminated because deflection match was
 within tolerance after  3 iterations.

Warning:  Solution is not acceptable because RMS error is too large.
```

```
MODCOMP5 Pavement Modulus Back-Calculation Program
Version 5.0  Release B   (4 October 1999 )
(C) Copyright Cornell Local Roads Program 1993-1999
(C) Copyright Cornell University 1993-1999
All Rights Reserved

Data File: C:\MODCOMP5\OUTPUT\SR4.DAT
Processed: Feb. 20, 2017 @ 17:03 hrs


 Sentido Descendente/SR4

                    Summary of Results for Each Iteration
                    -------------------------------------

                    (thicknesses in meters, moduli in MPa)

   Thickness:    .035         .200         .400         .500       Infinite

 Using Model:      0            0            0            0            0

 Seed Moduli:   1000.0       7000.0        100.0         55.0       3500.0

 Itn  RMS Err     E1           E2           E3           E4           E5
  1     53.99   1000.0 F     700.0 L      100.0 F       40.9 L     545.0 L
  2     15.24   1000.0 F     679.0 L      100.0 F      106.0 L     214.0 L
  3     13.65   1000.0 F     739.0 L      100.0 F       91.1 L     226.0 L
  4     13.68   1000.0 F     732.0 L      100.0 F       91.9 L     226.0 L

                L -> linear model for this layer
                F -> modulus for this layer has a fixed value

Elapsed time:  0:00:00      (      .2 sec. )

Computation terminated because deflection match was
 within tolerance after  4 iterations.

Modulus convergence rate of 1.00 percent was also satisfied.

Warning:  Solution is not acceptable because RMS error is too large.
```

AV.5. Desenhos representativos

ANEXO VI

REDE VIÁRIA REGIONAL

AVI.1. Classificação das estradas da rede viária regional

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Decreto do Presidente da República n.º 5/2016

de 14 de março

O Presidente da República decreta, nos termos do artigo 41.º, n.º 1, da Lei n.º 5/2011, de 2 de março — Lei das Ordens Honoríficas Portuguesas, o seguinte:

São nomeados chanceleres das antigas ordens militares, das ordens nacionais e das ordens de mérito civil, respetivamente, o Dr. Jaime José de Matos da Gama, a Dr.ª Maria Manuela Dias Ferreira Leite e a Professora Doutora Maria Helena Vaz de Carvalho Nazaré.

Assinado em 9 de março de 2016.

Publique-se.

O Presidente da República, MARCELO REBELO DE SOUSA.

NEGÓCIOS ESTRANGEIROS

Aviso n.º 5/2016

Por ordem superior se torna público que, em 19 de novembro de 2014 e em 19 de fevereiro de 2016, foram emitidas notas, respetivamente pelo Ministério dos Negócios Estrangeiros de Portugal e pelo Ministério dos Negócios Estrangeiros e dos Senegaleses no Exterior, em que se comunica terem sido cumpridas as respetivas formalidades constitucionais internas de aprovação da Convenção entre a República Portuguesa e a República do Senegal para Evitar a Dupla Tributação e Prevenir a Evasão Fiscal em Matéria de Impostos sobre o Rendimento, assinada em Lisboa, a 13 de junho de 2014.

A República Portuguesa é Parte nesta Convenção, a qual foi aprovada pela Resolução da Assembleia da República n.º 92/2014, em 3 de outubro, ratificada pelo Decreto do Presidente da República n.º 102/2014, de 12 de novembro, e publicada no *Diário da República*, 1.ª série, n.º 219, de 12 de novembro de 2014.

Nos termos do artigo 31.º da Convenção, esta entrará em vigor em 20 de março de 2016.

Direção-Geral de Política Externa, 29 de fevereiro de 2016. — O Diretor-Geral, *Francisco António Duarte Lopes*.

REGIÃO AUTÓNOMA DA MADEIRA

Assembleia Legislativa

Decreto Legislativo Regional n.º 15/2016/M

Segunda alteração ao Decreto Legislativo Regional n.º 15/2005/M, de 9 de agosto, que procede à classificação das estradas da rede viária regional

O Decreto Legislativo Regional n.º 15/2005/M, de 9 de agosto, procedeu à reestruturação da rede viária regional em decorrência da implementação de novas vias que provocaram profundas alterações naquele sistema.

Posteriormente, o Decreto Legislativo Regional n.º 1/2013/M, de 2 de janeiro, procurou adequar a classificação das estradas da rede viária regional à realidade existente, alterando em conformidade o Decreto Legislativo Regional n.º 15/2005/M, de 9 de agosto.

Impõe-se agora, atenta a experiência que entretanto foi colhida, promover uma melhoria qualitativa das condições de circulação nas estradas regionais, com especial relevo para a segurança rodoviária e o combate à sinistralidade.

Neste âmbito, destaca-se a necessidade de adequar os níveis de serviço legalmente previstos para a rede viária regional às reais características geométricas e funcionais das vias, em consonância com o que aliás sucede nas estradas da rede rodoviária nacional.

Por outro lado são reintegradas no domínio público municipal as vias marginais às ribeiras de S. João, Sta Luzia e João Gomes, corrigindo-se desta forma os erros cometidos na reclassificação anterior, bem como clarificados e reajustados os pontos de início e fim de algumas vias.

A Assembleia Legislativa da Região Autónoma da Madeira decreta, nos termos da alínea *a*) do n.º 1 do artigo 227.º e do n.º 1 do artigo 228.º da Constituição da República Portuguesa, conjugados com a alínea *c*) do n.º 1 do artigo 37.º e a alínea *ll*) do artigo 40.º do Estatuto Político-Administrativo da Região Autónoma da Madeira, aprovado pela Lei n.º 13/91, de 5 de junho, na redação dada pela Lei n.º 130/99, de 21 de agosto, e com a alteração introduzida pela Lei n.º 12/2000, de 21 de junho, o seguinte:

Artigo 1.º

Objeto

O presente diploma altera o Decreto Legislativo Regional n.º 15/2005/M, de 9 de agosto, com as alterações introduzidas pelo Decreto Legislativo Regional n.º 1/2013/M, de 2 de janeiro, que procede à classificação das estradas da rede viária regional.

Artigo 2.º

Alterações ao Decreto Legislativo Regional n.º 15/2005/M, de 9 de agosto

Os artigos 8.º e 11.º do Decreto Legislativo Regional n.º 15/2005/M, de 9 de agosto, alterado pelo Decreto Legislativo Regional n.º 1/2013/M, de 2 de janeiro, passam a ter a seguinte redação:

«Artigo 8.º

Nível de serviço

1 — As estradas regionais principais devem assegurar condições de circulação relativamente estáveis, embora com restrita liberdade quanto a velocidade e a ultrapassagens (nível de serviço C).

2 — [...].

3 — O disposto no número anterior não impede que determinados trechos das estradas regionais principais situados em zonas particularmente difíceis, por motivos de ordem topográfica ou urbanística, tenham sido ou possam ser projetados de modo que ao volume horário respetivo corresponda um nível de serviço inferior ao referido no n.º 1.

Artigo 11.º

Nível de serviço

1 — As estradas regionais complementares devem assegurar condições de circulação relativamente esta-

vais, embora com restrita liberdade quanto a velocidade e a ultrapassagem (nível de serviço D).

2 — [...].

3 — O disposto no número anterior não impede que determinados trechos das estradas regionais complementares situados em zonas particularmente difíceis, por motivos de ordem topográfica ou urbanística, tenham sido ou possam ser projetados de modo que ao volume horário respetivo corresponda nível de serviço inferior ao referido no n.º 1.»

Artigo 3.º

Alteração de anexos

Os anexos I, II, III e IV ao Decreto Legislativo Regional n.º 15/2005/M, de 9 de agosto, alterado pelo Decreto Legislativo Regional n.º 1/2013/M, de 2 de janeiro, passam a ter o conteúdo, incluindo as representações gráficas que os acompanham, constante dos anexos com a mesma numeração, aprovados pelo presente diploma.

Artigo 4.º

Aditamento

É aditado um artigo ao Decreto Legislativo Regional n.º 15/2005/M, de 9 de agosto, alterado pelo Decreto Legislativo Regional n.º 1/2013/M, de 2 de janeiro, com a seguinte redação:

«Artigo 14.º-A

Novas vias

As vias de comunicação construídas após a entrada em vigor do Decreto Legislativo Regional n.º 1/2013/M, de 2 de janeiro, são da responsabilidade da entidade promotora, sem prejuízo da sua transferência formal para uma entidade distinta.»

Artigo 5.º

Competências

1 — As referências feitas e as competências cometidas à Secretaria Regional do Equipamento Social e Transportes consideram-se reportadas e são exercidas pela Secretaria Regional dos Assuntos Parlamentares e Europeus.

2 — As competências cometidas ao Secretário Regional do Equipamento Social e Transportes consideram-se reportadas e são exercidas pelo Secretário Regional dos Assuntos Parlamentares e Europeus.

Artigo 6.º

Republicação

É republicado no anexo V o Decreto Legislativo Regional n.º 15/2005/M, de 9 de agosto.

Artigo 7.º

Entrada em vigor

O presente diploma entra em vigor no dia seguinte ao da sua publicação.

Aprovado em sessão plenária da Assembleia Legislativa da Região Autónoma da Madeira em 3 de março de 2016.

O Presidente da Assembleia Legislativa, *José Lino Tranquada Gomes.*

Assinado em 9 de março de 2016.

Publique-se.

O Representante da República para a Região Autónoma da Madeira, *Ireneu Cabral Barreto.*

ANEXO I

Rede Regional Principal

Estradas Regionais Principais

Ilha da Madeira

Numeração	Designação	Pontos Extremos e Intermédios
ER 101	Litoral da ilha da Madeira	Ribeira Brava — Câmara de Lobos — Funchal — Caniço — Santa Cruz — Machico — Porto da Cruz — Faial — Santana — São Vicente — Porto Moniz — Ponta do Pargo — Calheta — Ponta do Sol — Ribeira Brava
ER 102	Caniço — Camacha	Caniço (incluindo Rotunda da Cancela) — Camacha (incluindo Rotunda na ER 110)
ER 103	Funchal — Faial	Monte (Largo da Fonte) — Terreiro da Luta (ER 201) — Montado do Pereiro (ER 203) — Poiso (ER 202) — Ribeiro Frio — Cabouco da Achada (ER 217) — Faial (ER 101)
ER 104	Ribeira Brava — São Vicente	Ribeira Brava (Murteira — ER 101) — Serra de Água (Pinheiro ER 105) — Rosário (ER 228) — Saramago (ER 208) — Laranjal — São Vicente (Rotunda do Pé do Passo)
ER 105	Porto Moniz — Serra de Água	Porto Moniz (Portas da Vila — ER 101) — Fonte do Bispo (ER 210) — Paúl da Serra (ER 209 e ER 208) — Encumeada (ER 228) — Serra de Água (ER 104)
ER 106	Machico — Caniçal	Machico (Fazenda ER 101) — Caniçal (ER 214)
ER 107	Funchal — Curral das Freiras	Estrada Comandante Camacho de Freitas — Vasco Gil — Estrela — Curral das Freiras (Curral)
ER 108	Acesso ao Estreito de Câmara de Lobos	Câmara de Lobos (ER 101) — Estreito de Câmara de Lobos
ER 109	Viveiros — Vasco Gil	Rotunda dos Viveiros — Fundos — Vasco Gil (ER 107)

Numeração	Designação	Pontos Extremos e Intermédios
ER 110	Camacha — S. Roque do Faial	Vale Paraíso (ER 205) — Camacha (ER 102) — Águas Mansas (ER 206) — João Fernino (ER 202) — Santo António da Serra (ER 207) — Ribeira de Machico — Portela (ER 212) — Referta (ER 101) — Porto da Cruz — Monhos (ER 101)
ER 111	Ponta do Sol — Canhas	Ponta do Sol (ER 222) — Canhas (ER 222)
ER 112	Campanário — Boa Morte	Campanário (ER 230) — Boa Morte (Rotunda)
ER 113	Acesso ao centro de Câmara de Lobos	Câmara de Lobos (ER 108) — Câmara de Lobos (Forte da Rocha)
ER 114	Quebradas — Estrada Monumental	São Martinho (Quebradas — ER 101) — Estrada Monumental (Rotunda)
ER 115	Estrada da Liberdade	Rotunda Dom Francisco Santana — Pilar (ER 101)
ER 116	Acesso ao Porto do Funchal	Pilar (ER 115) — Av. Sá Carneiro (Rotunda)
ER 117	Acesso ao Jardim da Serra	Estreito de Câmara de Lobos (ER 108) — Jardim da Serra (Rotunda)
ER 118	Acesso à ER 101 no Funchal (Ribeira de João Gomes).	Rua Dom Ernesto Sena de Oliveira — Nó Pestana Júnior (ER 101)

Ilha do Porto Santo

Numeração	Designação	Pontos Extremos e Intermédios
ER 120	Calheta — Vila — Barroca — Vale do Touro — Porto. Barroca — Camacha — Serra de Dentro — Serra de Fora — Calhau da Serra de Fora.	Calheta — Campo de Baixo — Cidade Vila Baleira — Porto de Abrigo Cidade Vila Baleira — Dragoal — Farrobo — Camacha — Pedregal — Serra de Dentro — Serra de Fora — Calhau da Serra de Fora (Porto dos Frades)

ANEXO II

Rede Regional Complementar

Estradas Regionais Complementares

Ilha da Madeira

Numeração	Designação	Pontos Extremos e Intermédios
ER 201	Palheiro Ferreiro — Terreiro da Luta	Palheiro Ferreiro (ER 205) — Terreiro da Luta (ER 103)
ER 202	Santo António da Serra — Pico do Arieiro	Santo António da Serra (ER 110) — Terreiros (ER 215) — Poiso (ER 103) — Pico do Arieiro
ER 203	Vale Paraíso — Poiso	Vale Paraíso (ER 205) — Pedra do Poiso (ER 215) — Poiso (ER 103)
ER 204	Funchal — Porto Novo	Funchal (Boa Nova — ER 101) — Camacha (ER 102) — Caniço (ER 205) — Porto Novo (ER 206)
ER 205	Boa Nova — Caniço	Funchal (Boa Nova — ER 101) — (Palheiro Ferreiro — ER 201) — Vale Paraíso (ER 203) — Camacha — Caniço (ER 204)
ER 206	Porto Novo — Camacha	Porto Novo (ER 101) — Gaula — Camacha (Águas Mansas — ER 110)
ER 207	Santa Cruz — Santo António da Serra	Santa Cruz (ER 101) — Campo de Orólfe (ER 224) — Santo António da Serra — Variante ao centro de Santo António da Serra — Rotunda ER 110
ER 208	São Vicente — Paúl da Serra	São Vicente (Sarmento — ER 104) — Paúl da Serra (ER 105)
ER 209	Canhas — Ribeira da Janela	Canhas (Seixos — ER 222) — Paúl da Serra (ER 105) — Faial — Ribeira da Janela
ER 210	Prazeres — Fonte do Bispo	Prazeres (ER 222) — Fonte do Bispo (ER 105)
ER 211	Santana — São Vicente	Santana (Fajã da Corça — ER 101) — Achada da Cruz — São Jorge — Arco de São Jorge — Fajã do Penedo (ER 220) — Boaventura — Lombada — Ponta Delgada — São Vicente (Rotunda da Vila — ER 101)
ER 212	Machico — Portela	Machico (Rotunda da Serra D' Água) — Caramanchão — Ribeira de Machico (ER 225) — Portela (ER 110)
ER 213	Faial — Santana	Faial (ER 101) — Santana (ER 218) — Santana (ER 101)
ER 214	Machico — Caniçal	Entroncamento do Túnel do Caniçal (Lado Poente) — Caniçal (Baía de Abra)
ER 215	Meia Serra	Pedra do Poiso (ER 205) — Terreiros (ER 202)
ER 216	Ligação à Quinta Grande	Quinta Grande (ER 101 — ER 229)
ER 217	São Roque do Faial — Cabouco da Achada	São Roque do Faial (Monhos — ER 101) — Cabouco da Achada (ER 103)
ER 218	Ligação à Achada do Teixeira (Pico Ruivo)	Santana (ER 213) — Achada do Teixeira
ER 219	Ligação à freguesia da Ilha	Santana (Fajã da Corça — ER 101) — Ilha
ER 220	Boaventura — Lombo do Urzal	Boaventura (Fajã do Penedo — ER 211) — Lombo do Urzal

Numeração	Designação	Pontos Extremos e Intermédios
ER 221	Ligação ao Chão da Ribeira	Seixal (ER 101) — Chão da Ribeira
ER 222	Ponta do Pargo — Ribeira Brava	Ponta do Pargo (ER 101) — Ribeira das Faias (ER 223) — Raposeira (ER 101) — Prazeres (ER 210) — Estreito da Calheta (ER 223) — Calheta — Arco da Calheta — Canhas (Saldes — ER 209) — Ponta do Sol (ER 111 — ER 226) — Tabua (ER 227) — Ribeira Brava
ER 223	Fajã da Ovelha — Estreito da Calheta	Fajã da Ovelha (ER 222) — Paúl do Mar — Jardim do Mar — ER 101 — Estreito da Calheta (ER 222)
ER 224	Água de Pena — Santo António da Serra	Água de Pena — Santo António da Serra (ER 207)
ER 225	Ribeira de Machico — Santo António da Serra	Ribeira de Machico (ER 212) — Santo António da Serra
ER 226	Ligação da vila da Ponta do Sol para a ER 222	Rotunda da Ponta do Sol (ER 101) — Vila — ER 222
ER 227	Ligação da Tabua para a ER 222	Tabua (ER 101 — ER 222)
ER 228	Rosário — Encumeada	Rosário (ER 104) — Encumeada (ER 105)
ER 229	Ribeira Brava — Câmara de Lobos	Ribeira Brava (ER 101) — Campanário (ER 230) — Quinta Grande (ER 216) — Câmara de Lobos (ER 101)
ER 230	Ligação ao Campanário	Campanário (ER 101 — ER 112 — ER 229)
ER 231	Ligação ao Jardim da Serra	Estreito de Câmara de Lobos (ER 229) — Jardim da Serra (Rotunda)
ER107-1	Ligação à Eira do Serrado	Ribeira da Lapa (ER 107) — Miradouro (inclui acesso) — Casas Próximas (ER 107)

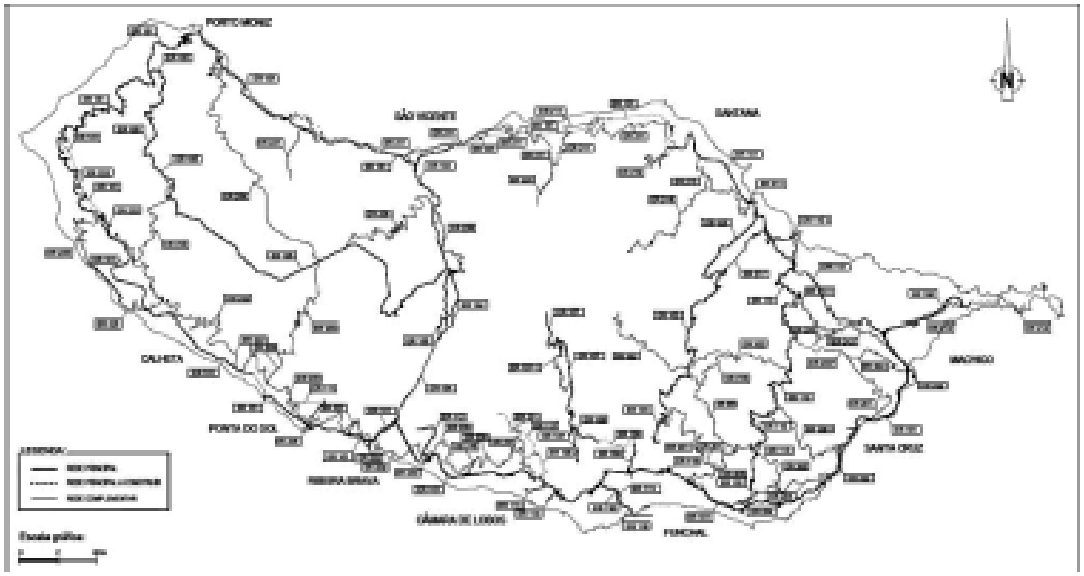
Ilha do Porto Santo

Numeração	Designação	Pontos Extremos e Intermédios
ER 260	Barroca — Serra de Fora	Barroca (ER 120) — Serra de Fora (ER 120)
ER 261	Dragoal — Camacha	Dragoal (ER 120) — Pico Castelo — Camacha (ER 120)
ER 262	Tanque — Aeroporto	Tanque (ER 120) — Aeroporto — Farrobo (ER 120)

Ilha da Madeira

Rede Regional Principal

Rede Regional Complementar

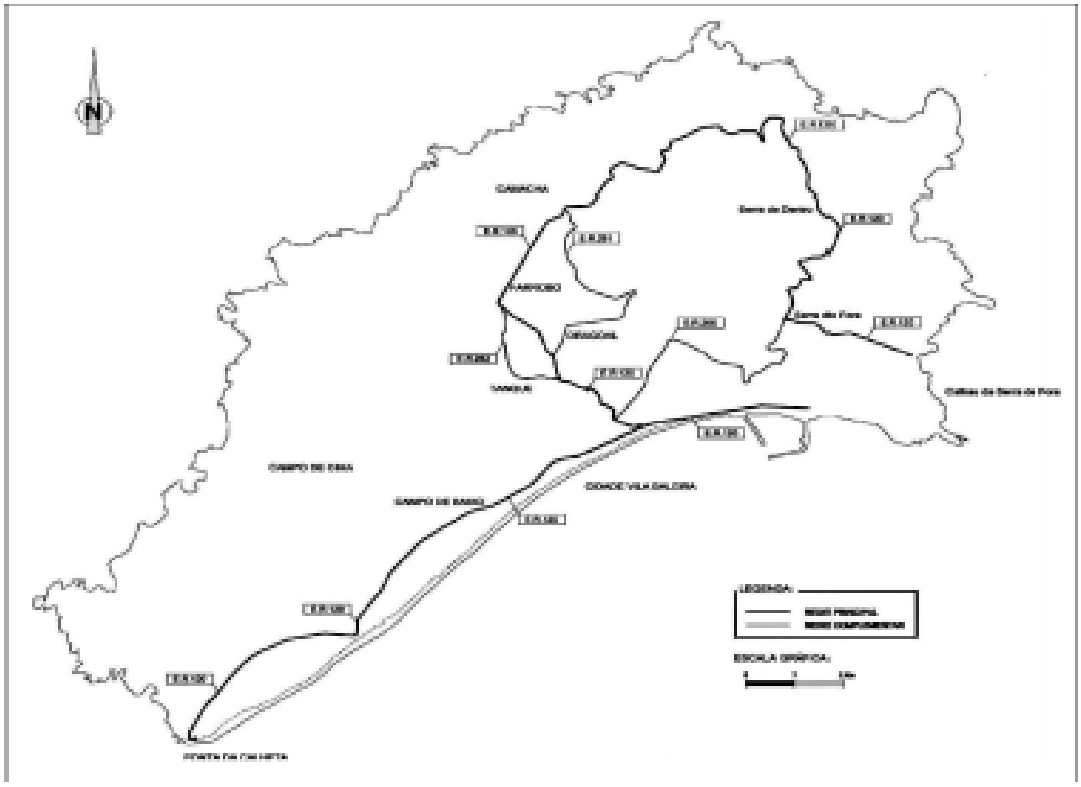


Desenho 1 — Ilha da Madeira.

Ilha do Porto Santo

Rede Regional Principal

Rede Regional Complementar



Desenho 3 — Ilha do Porto Santo.

ANEXO III

Classificação Funcional

Rede Regional de Vias Rápidas

Designação	Pontos Extremos	Pontos Extremos e Intermédios	Classificação na Rede
VR 1	Ribeira Brava (ER 101) — Caniçal (ER 106)	Ribeira Brava — Funchal — Caniço — Santa Cruz — Machico — Caniçal (ER 214)	ER 101 e ER 106
VR 2	Câmara do Lobos — Estreito de Câmara de Lobos	Câmara do Lobos (ER 101) — Estreito de Câmara de Lobos	ER 108

ANEXO IV

Classificação Funcional

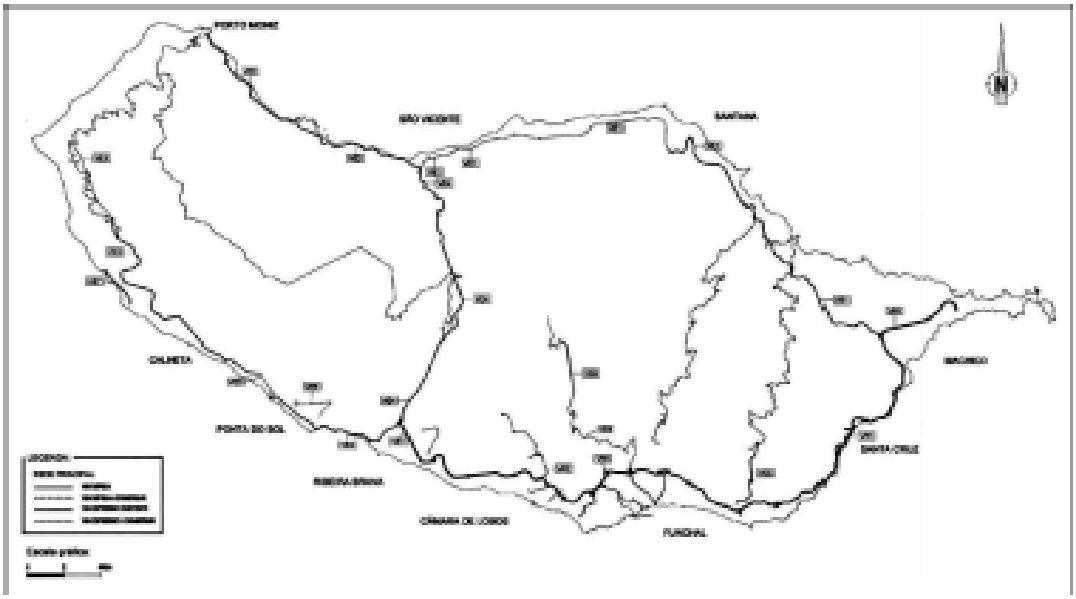
Rede Regional de Vias Expresso

Designação	Pontos Extremos	Pontos Extremos e Intermédios	Classificação na Rede
VE 1	Machico — S. Vicente	Machico — Porto da Cruz (ER 110) — Faial — Santana — Ribeira de S. Jorge — Arco de S. Jorge — Ponta Delgada — S. Vicente	ER 101
VE 2	S. Vicente — Porto Moniz	S. Vicente — Seixal — Ribeira da Janela — Porto Moniz	ER 101

Designação	Pontos Extremos	Pontos Extremos e Intermédios	Classificação na Rede
VE 3	Ponta do Pargo — Ribeira Brava	Ponta do Pargo — Raposeira — Prazeres — Calheta — Arco da Calheta — Madalena do Mar — Ponta do Sol — Ribeira Brava	ER 101
VE 4	Ribeira Brava — S. Vicente	Ribeira Brava — Serra de Água — Rosário — S. Vicente	ER 104
VE 5	Caniço — Camacha	Caniço (Cancela) — Camacha (Nogueira)	ER 102
VE 6	Curral das Freiras	Ribeira da Lapa — Casas Próximas	ER 107
VE 7	Paúl do Mar — Jardim do Mar	Paúl do Mar — Jardim do Mar	ER 223
VE 8	Funchal	Funchal (ER 101) — Funchal (ER 107)	ER 109
VE 9	Ponta do Sol — Canhas	Ponta do Sol (ER 222) — Canhas (ER 222)	ER 111

Ilha da Madeira

Classificação Funcional das estradas da rede regional principal



Desenho 2 — Ilha da Madeira.

ANEXO V

(a que se refere o artigo 6.º)

Republicação do Decreto Legislativo Regional n.º 15/2005/M, de 9 de agosto

CAPÍTULO I

Classificação das estradas da rede viária regional

SECÇÃO I

Classificação estrutural

Artigo 1.º

Classificação

As estradas que na Região Autónoma da Madeira desempenham funções de interesse regional integram-se em duas categorias:

a) Estradas regionais principais;
b) Estradas regionais complementares.

Artigo 2.º

Rede regional principal

1 — As estradas regionais principais são as vias de comunicação rodoviária de maior interesse regional, que asseguram as ligações entre as sedes de concelho ou destas com os principais centros de atividade económica, formando uma rede viária estruturante em ambas as ilhas.

2 — As estradas regionais principais constituem a rede regional principal e constam da relação anexa ao presente diploma, constituindo o anexo I, que dele faz parte integrante, com numeração iniciada em 101.

3 — As estradas regionais principais são objeto de uma classificação funcional nos termos do disposto na secção II do presente capítulo.

4 — Os trechos da rede regional principal, que constituam alternativas por via da existência de uma nova estrada adequada a sua classificação funcional, são desclassificados ou passam a integrar a rede regional complementar.

Artigo 3.º

Rede regional complementar

1 — As estradas regionais complementares são as que estabelecem as ligações entre as estradas regionais principais e os núcleos populacionais mais importantes e complementam a estrutura principal da rede regional principal.

2 — As estradas regionais complementares constituem a rede regional complementar e constam da relação anexa ao presente diploma, constituindo o anexo II, que dele faz parte integrante, com numeração iniciada em 201.

3 — As estradas regionais complementares não são globalmente objeto de uma classificação funcional, podendo alguns trechos desta rede ter, atendendo às suas características, a classificação funcional de via expresso, com as características estipuladas no artigo 6.º do presente diploma.

4 — Os trechos definidos no n.º 4 do artigo 2.º, integrados na rede complementar, com extensão inferior a 3 km, têm a designação que tinham na rede principal seguida de um algarismo (101-1) e os que têm extensão superior a 3 km têm a designação referida no n.º 3 do presente artigo, conforme consta da relação anexa, que constitui o anexo II ao presente diploma, que dele faz parte integrante.

SECÇÃO II

Classificação funcional

Artigo 4.º

Classificação

As estradas da rede viária regional podem integrar-se nas seguintes categorias funcionais:

a) Vias rápidas;
b) Vias expresso;
c) Vias regulares.

Artigo 5.º

Rede regional de vias rápidas

1 — As vias rápidas são os trechos da rede regional principal especificamente projetados e construídos para o tráfego motorizado, que não servem as propriedades limítrofes e que, cumulativamente:

a) Dispõem de faixas de rodagem distintas para os dois sentidos de tráfego, as quais são separadas uma da outra por uma zona central não destinada ao tráfego ou por outros dispositivos;
b) Não têm cruzamentos de nível com qualquer outra estrada;
c) Estão especialmente sinalizados como via rápida.

2 — As vias rápidas constituem a rede regional de vias rápidas e constam da relação anexa ao presente diploma, constituindo o anexo III, que dele faz parte integrante.

Artigo 6.º

Rede regional de vias expresso

1 — As vias expresso são os trechos da rede regional principal e excecionalmente da rede regional complementar que, não fazendo parte da rede regional de vias rápidas, dispõem, cumulativamente:

a) De uma faixa de rodagem com duas vias, pelo menos, de bermas pavimentadas ou passeios, e, no caso de possuírem acessos marginais, estes têm de ser condicionados;
b) De cruzamentos de nível ou de nós de ligação bem identificados e devidamente espaçados, acedendo a outras vias da rede regional;
c) De sinalização especial como via expresso.

2 — As vias expresso constituem a rede regional de vias expresso e constam da relação anexa ao presente diploma, constituindo o anexo IV, que dele faz parte integrante.

Artigo 7.º

Rede regional de vias regulares

Todas as estradas da rede regional principal não incluídas nos artigos 5.º e 6.º são vias regulares e constituem a rede regional de vias regulares.

CAPÍTULO II

Características técnicas da rede regional

SECÇÃO I

Rede regional principal

Artigo 8.º

Nível de serviço

1 — As estradas regionais principais devem assegurar condições de circulação relativamente estáveis, embora com restrita liberdade quanto à velocidade e a ultrapassagens (nível de serviço C).

2 — O nível de serviço estabelecido no número anterior deve ser mantido em todas as componentes de cada ligação, inclusivamente nas zonas de entre cruzamento, nos ramos dos nós de ligação e nos cruzamentos de nível.

3 — O disposto no número anterior não impede que determinados trechos das estradas regionais principais situados em zonas particularmente difíceis, por motivos de ordem topográfica ou urbanística, tenham sido ou possam ser projetados de modo que ao volume horário respetivo corresponda um nível de serviço inferior ao referido no n.º 1.

Artigo 9.º

Acesso às estradas regionais principais

1 — O acesso às estradas regionais principais, a partir de qualquer outro tipo de vias, faz-se por ligações devidamente espaçadas, que não interfiram com o nível de serviço desejado, ou por nós de ligação, sempre que se trate de ligações de estradas regionais principais.

2 — É proibido o acesso, a partir das propriedades marginais, às estradas regionais principais classificadas funcionalmente como via rápida, e a outras que, por portaria do Secretário Regional dos Assuntos Parlamentares e Europeus, venham a ser definidas.

3 — O acesso às estradas regionais classificadas funcionalmente como via expresso ou via regular, a partir de propriedades marginais, é condicionado nos termos da legislação aplicável em vigor, ou noutros a estabelecer.

Artigo 10.º

Travessia de centros urbanos

A travessia de centros urbanos pelas estradas regionais principais faz-se em traçado próprio, em princípio independente do tráfego local e tendo em atenção os respetivos planos de desenvolvimento.

SECÇÃO II

Rede regional complementar

Artigo 11.º

Nível de serviço

1 — As estradas regionais complementares devem assegurar condições de circulação relativamente estáveis, embora com restrita liberdade quanto a velocidade e a ultrapassagem (nível de serviço D).

2 — O nível de serviço estabelecido no número anterior deve ser mantido em todas as componentes de cada ligação, inclusivamente nas zonas de entre cruzamento, nos ramos dos nós de ligação e nos cruzamentos de nível.

3 — O disposto no número anterior não impede que determinados trechos das estradas regionais complementares situados em zonas particularmente difíceis, por motivos de ordem topográfica ou urbanística, tenham sido ou possam ser projetados de modo que ao volume horário respetivo corresponda nível de serviço inferior ao referido no n.º 1.

SECÇÃO III

Outras características técnicas

Artigo 12.º

Outras características técnicas da rede regional

As restantes características técnicas das estradas regionais principais e das estradas regionais complementares, relativas a características geométricas, dinâmicas e ambientais das vias, tais como a geometria dos traçados, o tipo e estrutura dos pavimentos, o número de vias de tráfego e de faixas de rodagem, conceção e espaçamento dos cruzamentos, largura das faixas *non aedificandi* ou *non altius tollendi*, encontram-se definidas nas normas de projeto elaboradas pela Direção Regional de Estradas e nos diplomas legais específicos, devendo em qualquer estrada regional ser observado o seguinte:

a) Em perfil longitudinal, as inclinações dos trainéis não deverão exceder, em regra, 9 %:

i) Em casos especiais, a inclinação poderá atingir 12 %, sendo necessária a sua justificação;

ii) Em todas as curvas de raio inferior a 15 m (lanceles) não será permitida inclinação superior a 5 %, salvo casos muito especiais e para os quais se exige justificação;

b) Em planta, as curvas de concordância dos alinhamentos retos terão os raios mínimos correspondentes aos das classes do plano rodoviário propostas e aprovadas:

i) Nos lanceles, o raio mínimo é de 15 m, podendo baixar a 12 m em casos muito especiais e para os quais se exige justificação;

c) Os perfis transversais das estradas serão os correspondentes aos das classes do plano rodoviário propostas e aprovadas:

i) Estes perfis poderão ser modificados em conformidade com a evolução estatística de tráfego, objetivos a atingir e limitações técnicas e económicas resultantes do acidentado do terreno.

CAPÍTULO III

Disposições finais

Artigo 13.º

Níveis de serviços

Os níveis de serviços previstos no diploma são os normalmente usados a nível internacional, definidos tendo como referência o disposto no Highway Capacity Manual, do Transportation Research Board, da National Academy of Science dos Estados Unidos da América.

Artigo 14.º

Competência de planeamento, construção e reparação

O planeamento e a gestão das estradas regionais compete a Secretaria Regional dos Assuntos Parlamentares e Europeus, através da Direção Regional de Estradas.

Artigo 14.º-A

Novas vias

As vias de comunicação construídas após a entrada em vigor do Decreto Legislativo Regional n.º 1/2013/M, de 2 de janeiro, são da responsabilidade da entidade promotora, sem prejuízo da sua transferência formal para uma entidade distinta.

Artigo 15.º

Desclassificação de estradas regionais

As vias de comunicação não constantes das relações anexas ao presente diploma integrar-se-ão na rede municipal.

Artigo 16.º

Norma revogatória

São revogados o Decreto Legislativo Regional n.º 22/92/M, de 16 de julho, e o Decreto Legislativo Regional n.º 19/93/M, de 30 de agosto.

Artigo 17.º

Entrada em vigor

O presente diploma entra em vigor no dia seguinte ao da sua publicação.

ANEXO I

Rede Regional Principal

Estradas Regionais Principais

Ilha da Madeira

Numeração	Designação	Pontos Extremos e Intermédios
ER 101	Litoral da ilha da Madeira	Ribeira Brava — Câmara de Lobos — Funchal — Caniço — Santa Cruz — Machico — Porto da Cruz — Faial — Santana — São Vicente — Porto Moniz — Ponta do Pargo — Calheta — Ponta do Sol — Ribeira Brava
ER 102	Caniço — Camacha	Caniço (incluindo Rotunda da Cancela) — Camacha (incluindo Rotunda na ER 110)
ER 103	Funchal — Faial	Monte (Largo da Fonte) — Terreiro da Luta (ER 201) — Monumento do Pereiro (ER 205) — Poiso (ER 202) — Ribeiro Frio — Cabouco da Achada (ER 217) — Faial (ER 101)
ER 104	Ribeira Brava — São Vicente	Ribeira Brava (Marteira — ER 101) — Serra de Água (Pinheiro ER 105) — Rosário (ER 228) — Sarsenago (ER 208) — Laranjal — São Vicente (Rotunda do Pé do Passo)
ER 105	Porto Moniz — Serra de Água	Porto Moniz (Portas da Vila — ER 101) — Fonte do Bispo (ER 210) — Paúl da Serra (ER 209 e ER 208) — Encumeada (ER 228) — Serra de Água (ER 104)
ER 106	Machico — Caniçal	Machico (Fazenda ER 101) — Caniçal (ER 214)
ER 107	Funchal — Curral da Freiras	Estrada Comandante Camacho de Freitas — Vasco Gil — Estrela — Curral das Freiras (Curral)
ER 108	Acesso ao Estreito de Câmara de Lobos	Câmara de Lobos (ER 101) — Estreito de Câmara de Lobos
ER 109	Viveiros — Vasco Gil	Rotunda dos Viveiros — Fundos — Vasco Gil (ER 107)
ER 110	Camacha — S. Roque do Faial	Vale Paraíso (ER 205) — Camacha (ER 102) — Águas Mansas (ER 206) — João Ferino (ER 202) — Santo António da Serra (ER 207) — Ribeira de Machico — Portela (ER 212) — Referta (ER 101) — Porto da Cruz — Moinhos (ER 101)
ER 111	Ponta do Sol — Canhas	Ponta do Sol (ER 222) — Canhas (ER 222)
ER 112	Campanário — Boa Morte	Campanário (ER 230) — Boa Morte (Rotunda)
ER 113	Acesso ao centro de Câmara de Lobos	Câmara de Lobos (ER 108) — Câmara de Lobos (Fonte da Rocha)
ER 114	Quebradas — Estrada Monumental	São Martinho (Quebradas — ER 101) — Estrada Monumental (Rotunda)
ER 115	Estrada da Liberdade	Rotunda Dom Francisco Santana — Pilar (ER 101)
ER 116	Acesso ao Porto do Funchal	Pilar (ER 115) — Av. Sá Carneiro (Rotunda)
ER 117	Acesso ao Jardim da Serra	Estreito de Câmara de Lobos (ER 108) — Jardim da Serra (Rotunda)
ER 118	Acesso à ER 101 no Funchal (Ribeira de João Gomes).	Rua Dom Ernesto Sena de Oliveira — Nó Pestana Júnior (ER 101)

Ilha do Porto Santo

Numeração	Designação	Pontos Extremos e Intermédios
ER 120	Calheta — Vila — Barroca — Vale do Touro — Porto. Barroca — Camacha — Serra de Dentro — Serra de Fora — Calhau da Serra de Fora.	Calheta — Campo de Baixo — Cidade Vila Baleira — Porto de Abrigo Cidade Vila Baleira — Dragoal — Farrobo — Camacha — Pedregal — Serra de Dentro — Serra de Fora — Calhau da Serra de Fora (Porto dos Frades)

ANEXO II

Rede Regional Complementar

Estradas Regionais Complementares

Ilha da Madeira

Numeração	Designação	Pontos Extremos e Intermédios
ER 201	Palheiro Ferreiro — Terreiro da Luta	Palheiro Ferreiro (ER 205) — Terreiro da Luta (ER 103)
ER 202	Santo António da Serra — Pico do Arieiro	Santo António da Serra (ER 110) — Terreiros (ER 215) — Poiso (ER 103) — Pico do Arieiro
ER 203	Vale Paraíso — Poiso	Vale Paraíso (ER 205) — Pedra do Poiso (ER 215) — Poiso (ER 103)
ER 204	Funchal — Porto Novo	Funchal (Boa Nova — ER 101) — Cancela (ER 102) — Caniço (ER 205) — Porto Novo (ER 206)
ER 205	Boa Nova — Caniço	Funchal (Boa Nova — ER 101) — (Palheiro Ferreiro — ER 201) — Vale Paraíso (ER 205) — Camacha — Caniço (ER 204)
ER 206	Porto Novo — Camacha	Porto Novo (ER 101) — Ginja — Camacha (Águas Mansas — ER 110)
ER 207	Santa Cruz — Santo António da Serra	Santa Cruz (ER 101) — Campo de Golfe (ER 224) — Santo António da Serra — Variante ao centro de Santo António da Serra — Rotunda ER 110
ER 208	São Vicente — Paúl da Serra	São Vicente (Sarsenago — ER 104) — Paúl da Serra (ER 105)
ER 209	Canhas — Ribeira da Janela	Canhas (Salbes — ER 222) — Paúl da Serra (ER 105) — Faial — Ribeira da Janela
ER 210	Prazeres — Fonte do Bispo	Prazeres (ER 222) — Fonte do Bispo (ER 105)

Numeração	Designação	Pontos Extremos e Intermédios
ER 211	Santana — São Vicente	Santana (Fajã da Corça — ER 101) — Achada da Cruz — São Jorge — Arco de São Jorge — Fajã do Penedo (ER 220) — Boaventura — Lombada — Ponta Delgada — São Vicente (Rotunda da Vila — ER 101)
ER 212	Machico — Portela	Machico (Rotunda da Serra D' Água) — Caramanchão — Ribeira do Machico (ER 225) — Portela (ER 110)
ER 213	Faial — Santana	Faial (ER 101) — Santana (ER 218) — Santana (ER 101)
ER 214	Machico — Caniçal	Emboquilhamento do Túnel do Caniçal (Lado Poente) — Caniçal (Baía de Abra)
ER 215	Meia Serra	Pedra do Poiso (ER 203) — Terreiros (ER 202)
ER 216	Ligação à Quinta Grande	Quinta Grande (ER 101 — ER 229)
ER 217	São Roque do Faial — Cabouco da Achada	São Roque do Faial (Moinhos — ER 101) — Cabouco da Achada (ER 103)
ER 218	Ligação à Achada do Teixeira (Pico Ruivo)	Santana (ER 213) — Achada do Teixeira
ER 219	Ligação à freguesia da Ilha	Santana (Fajã da Corça — ER 101) — Ilha
ER 220	Boaventura — Lombo do Urzal	Boaventura (Fajã do Penedo — ER 211) — Lombo do Urzal
ER 221	Ligação ao Chão da Ribeira	Seixal (ER 101) — Chão da Ribeira
ER 222	Ponta do Pargo — Ribeira Brava	Ponta do Pargo (ER 101) — Ribeira das Faias (ER 223) — Raposeira (ER 101) — Prazeres (ER 210) — Estreito da Calheta (ER 223) — Calheta — Arco da Calheta — Canhas (Saídas — ER 209) — Ponta do Sol (ER 111 — ER 226) — Tabua (ER 227) — Ribeira Brava
ER 223	Fajã da Ovelha — Estreito da Calheta	Fajã da Ovelha (ER 222) — Paúl do Mar — Jardim do Mar — ER 101 — Estreito da Calheta (ER 222)
ER 224	Água de Pena — Santo António da Serra	Água de Pena — Santo António da Serra (ER 207)
ER 225	Ribeira de Machico — Santo António da Serra	Ribeira de Machico (ER 212) — Santo António da Serra
ER 226	Ligação da vila da Ponta do Sol para a ER 222	Rotunda da Ponta do Sol (ER 101) — Vila — ER 222
ER 227	Ligação da Tabua para a ER 222	Tabua (ER 101 — ER 222)
ER 228	Rosário — Encumeada	Rosário (ER 104) — Encumeada (ER 105)
ER 229	Ribeira Brava — Câmara de Lobos	Ribeira Brava (ER 101) — Campanário (ER 230) — Quinta Grande (ER 216) — Câmara de Lobos (ER 101)
ER 230	Ligação ao Campanário	Campanário (ER 101 — ER 112 — ER 229)
ER 231	Ligação ao Jardim da Serra	Estreito de Câmara de Lobos (ER 229) — Jardim da Serra (Rotunda)
ER107-1	Ligação à Eira do Serrado	Ribeira da Lapa (ER 107) — Miradouro (inclui acesso) — Casas Próximas (ER 107)

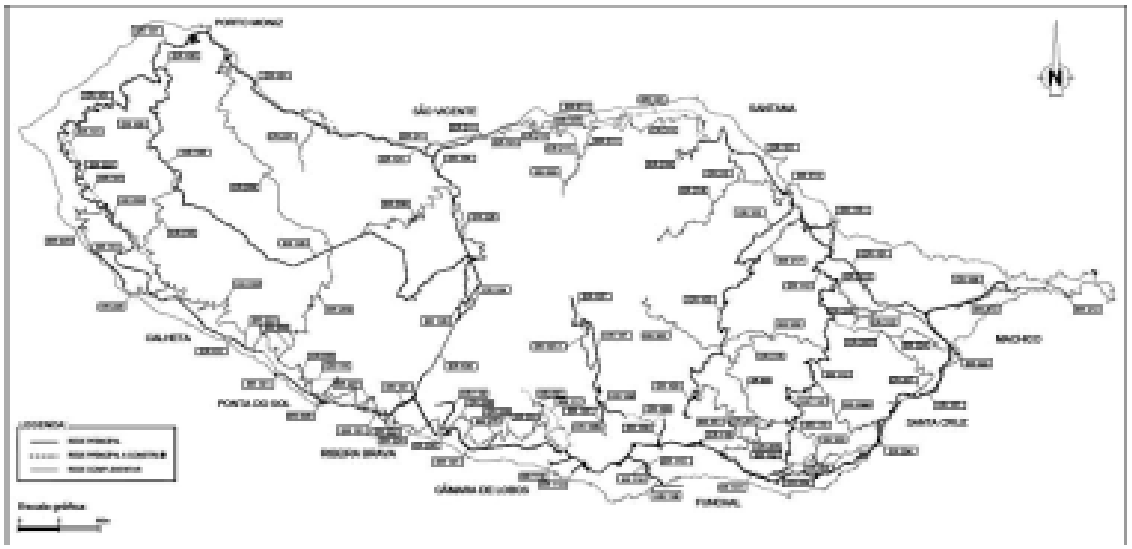
Ilha do Porto Santo

Numeração	Designação	Pontos Extremos e Intermédios
ER 260	Barroca — Serra de Fora	Barroca (ER 120) — Serra de Fora (ER 120)
ER 261	Dragoal — Camacha	Dragoal (ER 120) — Pico Castelo — Camacha (ER 120)
ER 262	Tanque — Aeroporto	Tanque (ER 120) — Aeroporto — Farrobo (ER 120)

Ilha da Madeira

Rede Regional Principal

Rede Regional Complementar

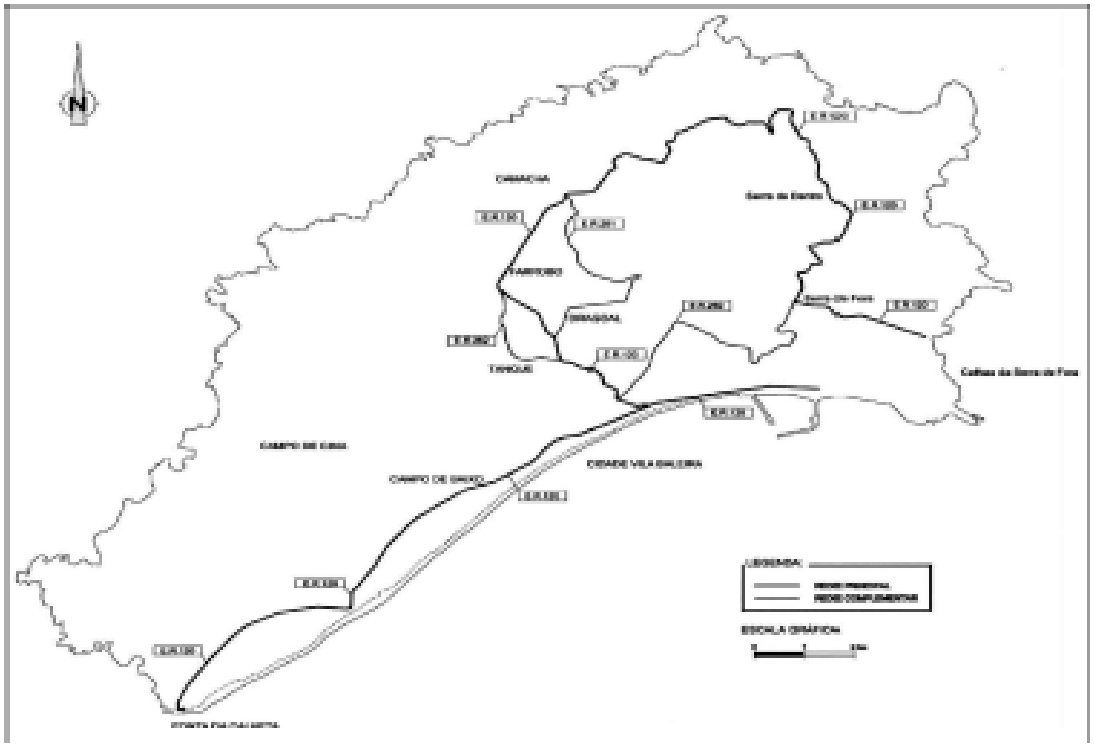


Desenho 1 — Ilha da Madeira.

Ilha do Porto Santo

Rede Regional Principal

Rede Regional Complementar



Desenho 3 — Ilha do Porto Santo.

ANEXO III

Classificação Funcional

Rede Regional de Vias Rápidas

Designação	Pontos Extremos	Pontos Extremos e Intermédios	Classificação na Rede
VR 1	Ribeira Brava (ER 101) — Caniçal (ER 106)	Ribeira Brava — Funchal — Caniço — Santa Cruz — Machico — Caniçal (ER 214)	ER 101 e ER 106
VR 2	Câmara do Lobos — Estreito de Câmara de Lobos	Câmara do Lobos (ER 101) — Estreito de Câmara de Lobos	ER 108

ANEXO IV

Classificação Funcional

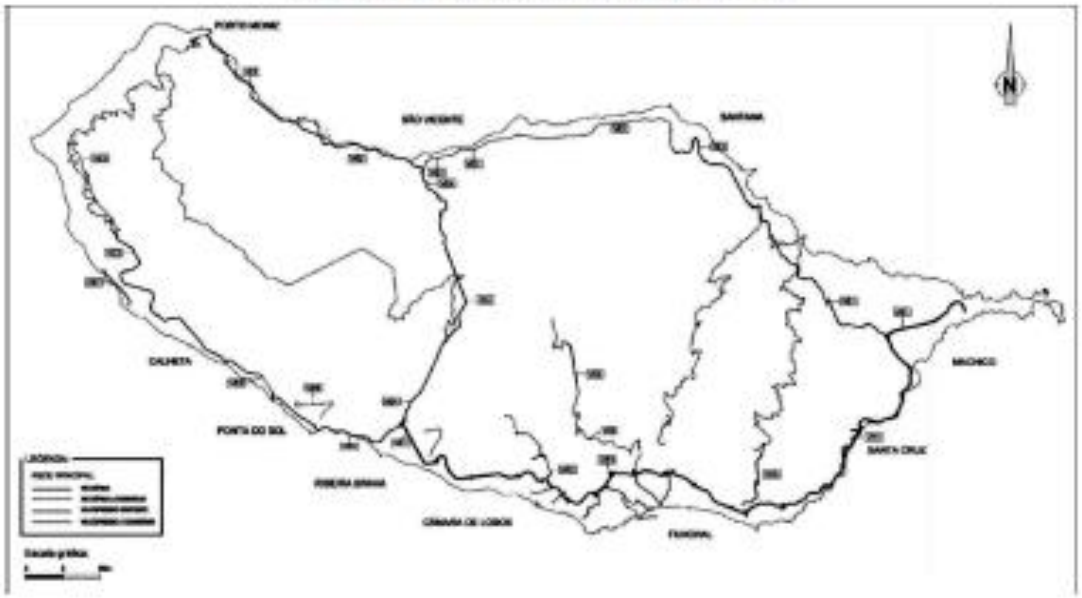
Rede Regional de Vias Expresso

Designação	Pontos Extremos	Pontos Extremos e Intermédios	Classificação na Rede
VE 1	Machico — S. Vicente	Machico — Porto da Cruz (ER 110) — Faial — Santana — Ribeira de S. Jorge — Arco de S. Jorge — Ponta Delgada — S. Vicente	ER 101
VE 2	S. Vicente — Porto Moniz	S. Vicente — Seixal — Ribeira da Janela — Porto Moniz	ER 101

Designação	Pontos Extremos	Pontos Extremos e Intermédios	Classificação na Rede
VE 3	Ponta do Pargo — Ribeira Brava	Ponta do Pargo — Raposeira — Prazeres — Calheta — Arco da Calheta — Madalena do Mar — Ponta do Sol — Ribeira Brava	ER 101
VE 4	Ribeira Brava — S. Vicente	Ribeira Brava — Serra de Água — Rosário — S. Vicente	ER 104
VE 5	Caniço — Camacha	Caniço (Cancela) — Camacha (Nogueira)	ER 102
VE 6	Curral das Freiras	Ribeira da Lapa — Casas Próximas	ER 107
VE 7	Paúl do Mar — Jardim do Mar	Paúl do Mar — Jardim do Mar	ER 223
VE 8	Funchal	Funchal (ER 101) — Funchal (ER 107)	ER 109
VE 9	Ponta do Sol — Canhas	Ponta do Sol (ER 222) — Canhas (ER 222)	ER 111

Ilha da Madeira

Classificação Funcional das estradas da rede regional principal



Desenho 2 — Ilha da Madeira.

AVI.2. Estradas regionais principais

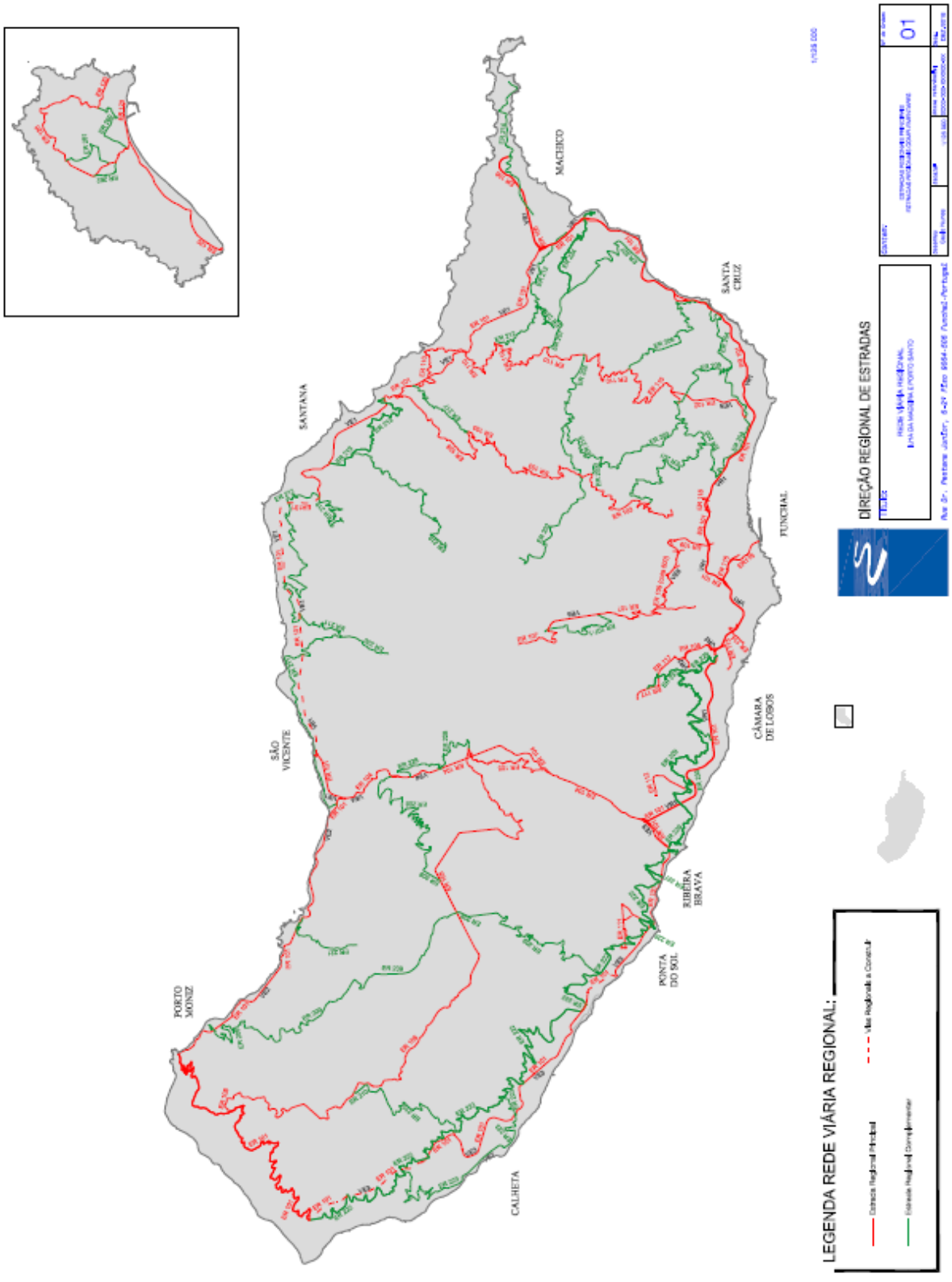


Figura 92 – Estradas Regionais Principais e Complementares

AVI.3. Concessão da VIALITORAL

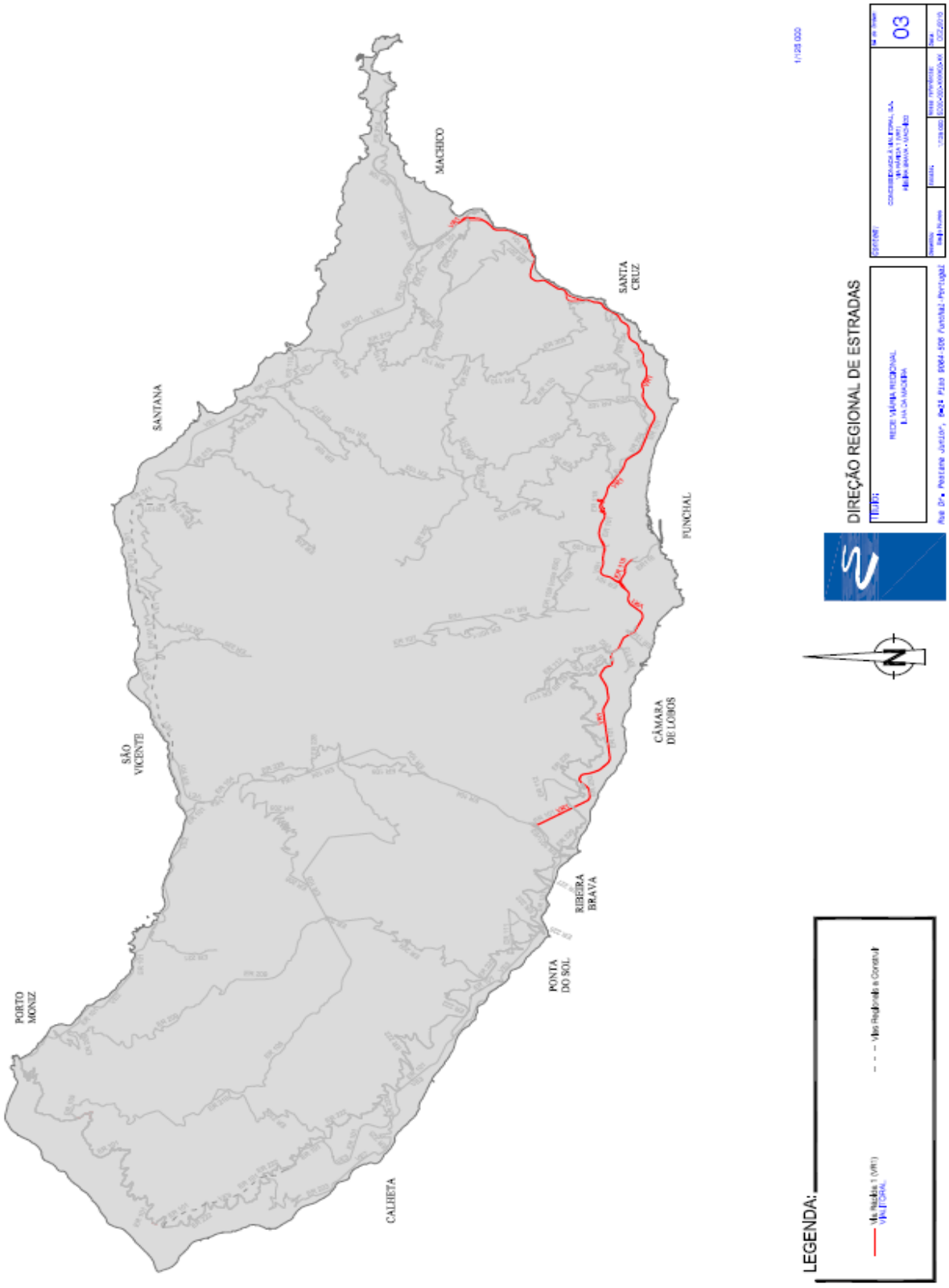


Figura 93 – Concessão da VIALITORAL - Via Rápida (VR1)

ANEXO VII

ALTERAÇÃO DO NÓ RODOVIÁRIO

AVII.1. Pavimentação: Planta geral dos pavimentos

AVII.2. Pavimentação: Promenores de Pavimentação

ANEXO VIII

I-MIX DESIGN

AVIII.1. Metodologia de funcionamento do i-Mix Design

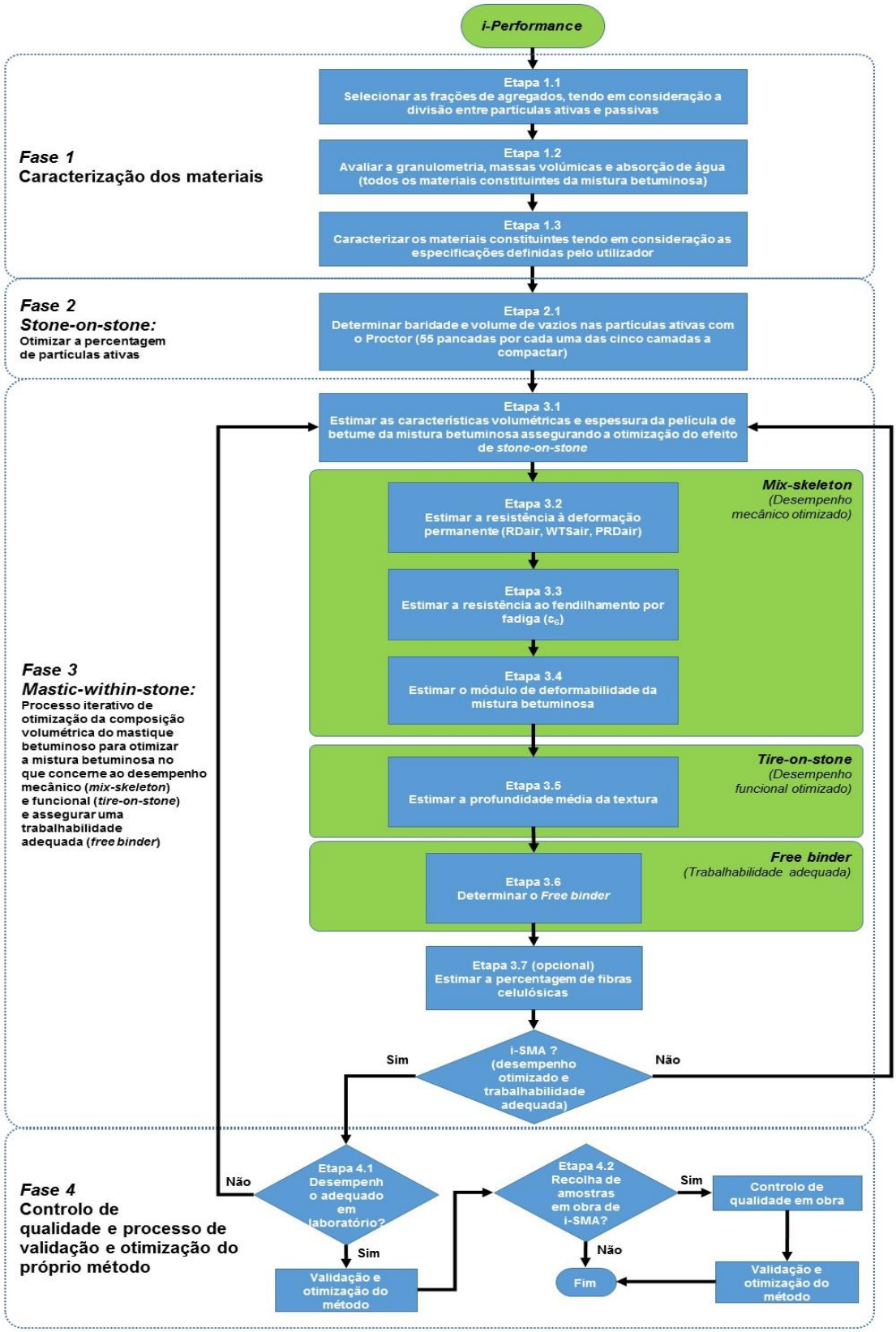


Figura 94 - Método de formulação e de controlo de qualidade de uma misturas betuminosa descontínua tipo SMA

AVIII.2. Contributos do método de formulação i-Mix Design

Requerimentos	Métodos de formulação convencionais (i.e. *Marshall*)	Método desenvolvido de formulação e controlo de qualidade de misturas SMA
Processo de formulação e avaliação do desempenho	Processo iterativo de otimização da percentagem de betume realizado em laboratório através do fabrico de diferentes conjuntos de provetes de mistura betuminosa É requerido que a curva granulométrica respeite os fusos granulométricos especificados em cada país	Processo iterativo de otimização da mistura betuminosa em gabinete através do método e *Software* desenvolvidos A curva granulométrica é definida em função das características dos materiais utilizados por forma a otimizar o desempenho da mistura, facilitando a aplicação do método a nível internacional
Conhecimento do utilizador na formulação de misturas do tipo SMA	Elevado	Médio/Reduzido
Ensaios laboratoriais mínimos utilizados para formulação	Granulometria Massas volúmicas dos materiais Índice de forma Índice de achatamento Resistência à fragmentação Estudo *Marshall* (20 provetes)	Granulometria Massas volúmicas dos materiais Índice de forma Índice de achatamento Resistência à fragmentação Volume de vazios e baridade das partículas ativas As características volumétricas da SMA compactada são estimadas de forma interativa com o método e *Software* desenvolvidos
Ensaios laboratoriais utilizados para avaliar o desempenho	Escorrimento de material betuminoso (2 provetes) Sensibilidade à água (8 provetes) Resistência à deformação permanente (2 lajetas) Resistência à fadiga (2 lajetas) Profundidade média da textura	Os resultados dos ensaios de avaliação do desempenho indicados na coluna da esquerda são estimados de forma interativa com o método e *Software* desenvolvidos Reduz significativamente a necessidade de realização de ensaios em laboratório. Sendo o seu fabrico realizado para confirmar laboratorialmente os resultados obtidos no método/*Software*. Sempre que tal se verifique, os resultados poderão ser, adicionalmente, incorporados na base de dados para contínua melhoria do método desenvolvido

Tabela 106 - Análise comparativa de contributo relativamente aos métodos de formulação convencionais

Requerimentos	Métodos de formulação convencionais (i.e. *Marshall*)	Método desenvolvido de formulação e controlo de qualidade de misturas SMA
Tempo estimado para formulação e avaliação do desempenho	240 horas	10 horas
Custo estimado do estudo	Elevado (valor estimado de 10 000 – 20 000 euros)	Reduzido (valor estimado de 200 – 500 euros)
Investimento estimado em equipamentos de laboratório	Elevado (aproximadamente 200 000 euros)	Reduzido (aproximadamente 5 000 euros)
Segurança e higiene no trabalho	A utilização de betume, agregados e fíler, assim como de solventes para a limpeza dos equipamentos utilizados no fabrico de provetes, conduz a um elevado tempo e grau de exposição dos Experimentadores/Engenheiros à inalação de gases e partículas finas potenciando o desenvolvimento de doenças oncológicas	Redução do tempo e grau de exposição dos Experimentadores/Engenheiros a gases e partículas finas durante o fabrico de provetes, como resultado da prévia otimização da mistura SMA em gabinete
Controlo de qualidade em obra	Não existe a definição de parâmetros de controlo da qualidade em obra relacionados com o estudo laboratorial efetuado	Permite o controlo de qualidade em obra da mistura SMA formulada através da estimativa do desempenho

Tabela 107 - Análise comparativa de contributo relativamente aos métodos de formulação convencionais (continuação)

ANEXO IX

PREÇOS DE APLICAÇÃO

AIX.1. Lista de preços unitários para diferentes misturas betuminosas

Misturas Betuminosas			(%)	€/ton	Espessura (m)	Custo (€/m²)
Camada grossa ThinGap	Agregados	Brita 0/3	0,00%	0,00	0,05	11,77
		Brita 0/4	35,20%	2,82		
		Brita 4/12	52,80%	4,22		
	Mão de obra		-	2,00		
	Estaleiro		-	2,00		
	Gasóleo		-	23,00		
	Ligante Betuminoso	PEN 35/50	7,20%	22,46		
		RAR	4,80%	39,60		
TOTAL (€/ton)				**96,1**		
Camada fina ThinGap	Agregados	Brita 0/3	0,00%	0,00	0,03	7,06
		Brita 0/4	35,20%	2,82		
		Brita 4/12	52,80%	4,22		
	Mão de obra		-	2,00		
	Estaleiro		-	2,00		
	Gasóleo		-	23,00		
	Ligante Betuminoso	PEN 35/50	7,20%	22,46		
		RAR	4,80%	39,60		
TOTAL (€/ton)				**96,1**		
Solução Tradicional	Agregados	Brita 0/3	25,00%	2,00	0,05	6,32
		Brita 3/8	50,00%	4,00		
		Brita 8/12	20,00%	1,60		
	Mão de obra		-	2,00		
	Estaleiro		-	2,00		
	Gasóleo		-	23,00		
	Ligante (35/50)		5,00%	15,60		
TOTAL (€/ton)				**50,20**		
Solução Tradicional com betume "semi-modificado" com RAR	Agregados	Brita 0/3	25,00%	2,00	0,05	6,80
		Brita 3/8	50,00%	4,00		
		Brita 8/12	20,00%	1,60		
	Mão de obra		-	2,00		
	Estaleiro		-	2,00		
	Gasóleo		-	23,00		
	Ligante Betuminoso	PEN 35/50	4,25%	13,26		
		RAR	0,75%	6,19		
TOTAL (€/ton)				**54,05**		

AIX.2. Lista de preços unitários para cada estudo de reabilitação

EMPREITADA DE BENEFICIAÇÃO DO PAVIMENTO — **Estrada da Liberdade**

Lista de Preços Unitários — **Solução Camada grossa ThinGap com RAR**

Código	Designação dos Trabalhos	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I	**Pavimentação** Trabalhos a realizar de acordo com o projecto e satisfazendo o especificado no Caderno de Encargos de Pavimentação, Controlo de Qualidade e Dossier de Exploração , considerando as espessuras das camadas após compactação, incluindo a preparação prévia do pavimento, o fornecimento dos materiais e as suas aplicações				
I.1	**Selagem de fissuras** com mastique betuminoso (Item 2.5.6.4 do CE), e incluindo todos os trabalhos complementares	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.1.1 e I.1.2	Fissuras longitudinais e obliquas localizadas nas vias e bermas e Fissuras Transversais	m	110	10,00 €	1 100,00 €
I.2	**Enchimento das fissuras muitos abertas** com areão lavado (bago de arroz) ou calda de cimento e com mastique betuminoso (Item 2.5.6.4 do CE), e incluindo todos os trabalhos complementares	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.2.1	Fissuras longitudinais	m	0	15,00 €	0,00 €
I.3	**Reparação de zonas localizadas** e incluindo todos os trabalhos complementares	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.3.1	Reparação de ninhos/esquinas partidas, incluindo delimitação da área a remendar, remoção dos materiais danificados, limpeza da área, fornecimento e aplicação de rega de colagem (item 1.1.3.6 do CE) e macadame betuminoso (tendo por base o Fuso A - item 1.11.1.1 do CE)	m^2	0	20,00 €	0,00 €
I.4	**Reparações Estruturais** e incluindo todos os trabalhos complementares (a verificar em obra)	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.4.1	Remoção por fresagem de camadas de pavimentos existentes (espessura mínima de 6.0cm), incluindo transporte a vazadouro e eventual indemnização a terceiros, limpeza da zonas fresada com escovas mecânicas e jacto de ar	m^2	0	8,00 €	0,00 €
I.4.2	Fornecimento e aplicação de rega de colagem modificada (item 1.1.3.6 do CE)		0	1,10 €	0,00 €
I.4.3	Fornecimento e aplicação de macadame betuminoso (tendo por base o Fuso A - item 1.11.1.1 do CE), com espessura de mínima de 6,0 cm		0	6,32 €	0,00 €
I.5	**Fresagem do pavimento existente** Incluindo limpezas, semagem, tratamento de juntas e transporte a vazadouro dos materiais sobrantes	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.5.1	Remoção por fresagem da camada de desgaste do pavimento existente (espessura mínima de 6.0cm), incluindo transporte a vazadouro e eventual indemnização a terceiros, limpeza da zonas fresada com escovas mecânicas e jacto de ar	m^2	3 640	8,00 €	29 120 €
I.6	**Rega de Colagem**	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.6.1	Aplicação da Rega Modificada (item 1.1.3.6 do CE)	m^2	3 640	1,10 €	4 004 €
I.7	**Camadas de misturas betuminosas a quente** e incluindo todos os trabalhos complementares	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.7.1	Fornecimento e aplicação de ThinGap com RAR, com espessura de mínima de 6,0 cm	m^2	3 640	11,77 €	42 853 €
				TOTAL	77 077 €

	EMPREITADA DE BENEFICIAÇÃO DO PAVIMENTO Lista de Preços Unitários		Estrada da Liberdade Solução Camada fina ThinGap com RAR		
Código	Designação dos Trabalhos	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I	**Pavimentação** Trabalhos a realizar de acordo com o projecto e satisfazendo o especificado no Caderno de Encargos de Pavimentação, Controlo de Qualidade e Dossier de Exploração , considerando as espessuras das camadas após compactação, incluindo a preparação prévia do pavimento, o fornecimento dos materiais e as suas aplicações				
I.1	**Selagem de fissuras** com mastique betuminoso (Item 2.5.6.4 do CE), e incluindo todos os trabalhos complementares	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.1.1 e I.1.2	Fissuras longitudinais e obliquas localizadas nas vias e bermas e Fissuras Transversais	m	220	10,00 €	2 200,00 €
I.2	**Enchimento das fissuras muitos abertas** com areão lavado (bago de arroz) ou calda de cimento e com mastique betuminoso (Item 2.5.6.4 do CE), e incluindo todos os trabalhos complementares	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.2.1	Fissuras longitudinais	m	0	15,00 €	0,00 €
I.3	**Reparação de zonas localizadas** e incluindo todos os trabalhos complementares	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.3.1	Reparação de ninhos/esquinas partidas, incluindo delimitação da área a remendar, remoção dos materiais danificados, limpeza da área, fornecimento e aplicação de rega de colagem (item 1.1.3.6 do CE) e macadame betuminoso (tendo por base o Fuso A - item 1.11.1.1 do CE)	m^2	0	20,00 €	0,00 €
I.4	**Reparações Estruturais** e incluindo todos os trabalhos complementares (a verificar em obra)	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.4.1	Remoção por fresagem de camadas de pavimentos existentes (espessura mínima de 5.0cm), incluindo transporte a vazadouro e eventual indemnização a terceiros, limpeza da zonas fresada com escovas mecânicas e jacto de ar	m^2	604	8,00 €	4 835,80 €
I.4.2	Fornecimento e aplicação de rega de colagem modificada (item 1.1.3.6 do CE)		604	1,10 €	664,90 €
I.4.3	Fornecimento e aplicação de macadame betuminoso (tendo por base o Fuso A - item 1.11.1.1 do CE), com espessura de mínima de 5.0 cm		604	6,32 €	3 820,12 €
I.5	**Fresagem do pavimento existente** incluindo limpezas, serragem, tratamento de juntas e transporte a vazadouro dos materiais sobrantes	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.5.1	Ensaibre da camada de desgaste	m^2	700	8,00 €	5 600 €
I.6	**Rega de Colagem**	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.6.1	Aplicação da Rega Modificada (item 1.1.3.6 do CE)	m^2	3 640	1,10 €	4 004 €
I.7	**Camadas de misturas betuminosas a quente** e incluindo todos os trabalhos complementares	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.7.1	Fornecimento e aplicação de ThinGap com RAR, com espessura de mínima de 3,0 cm	m^2	3 640	7,06 €	25 698 €
				TOTAL	46 823 €

EMPREITADA DE BENEFICIAÇÃO DO PAVIMENTO — **Estrada da Liberdade**

Lista de Preços Unitários — **Solução Tradicional**

Código	Designação dos Trabalhos	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I	**Pavimentação** Trabalhos a realizar de acordo com o projecto e satisfazendo o especificado no Caderno de Encargos de Pavimentação, Controlo de Qualidade e Dossier de Exploração , considerando as espessuras das camadas após compactação, incluindo a preparação prévia do pavimento, o fornecimento dos materiais e as suas aplicações				
I.1	**Selagem de fissuras** com mastique betuminoso (Item 2.5.6.4 do CE), e incluindo todos os trabalhos complementares	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.1.1 e I.1.2	Fissuras longitudinais e obliquas localizadas nas vias e bermas e Fissuras Transversais	m	110	10,00 €	1 100,00 €
I.2	**Enchimento das fissuras muitos abertas** com areão lavado (bago de arroz) ou calda de cimento e com mastique betuminoso (Item 2.5.6.4 do CE), e incluindo todos os trabalhos complementares	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.2.1	Fissuras longitudinais	m	0	15,00 €	0,00 €
I.3	**Reparação de zonas localizadas** e incluindo todos os trabalhos complementares	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.3.1	Reparação de ninhos/lesquinas partidas, incluindo delimitação da área a remendar, remoção dos materiais danificados, limpeza da área, fornecimento e aplicação de rega de colagem (item 1.1.3.5 do CE) e macadame betuminoso (tendo por base o Fuso A - item 1.11.1.1 do CE)	m²	0	20,00 €	0,00 €
I.4	**Reparações Estruturais** e incluindo todos os trabalhos complementares (a verificar em obra)	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.4.1	Remoção por fresagem de camadas de pavimentos existentes (espessura mínima de 6.0cm), incluindo transporte a vazadouro e eventual indemnização a terceiros, limpeza da zonas fresada com escovas mecânicas e jacto de ar	m²	0	8,00 €	0,00 €
I.4.2	Fornecimento e aplicação de rega de colagem modificada (item 1.1.3.5 do CE)		0	1,10 €	0,00 €
I.4.3	Fornecimento e aplicação de macadame betuminoso (tendo por base o Fuso A - item 1.11.1.1 do CE), com espessura de mínima de 5.0 cm		0	6,32 €	0,00 €
I.5	**Fresagem do pavimento existente** Incluindo limpezas, serragem, tratamento de juntas e transporte a vazadouro dos materiais sobrantes	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.5.1	Remoção por fresagem da camada de desgaste do pavimento existente (espessura mínima de 6.0cm), incluindo transporte a vazadouro e eventual indemnização a terceiros, limpeza da zonas fresada com escovas mecânicas e jacto de ar	m²	3 640	8,00 €	29 120 €
I.6	**Rega de Colagem**	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.6.1	Aplicação da Rega Modificada (item 1.1.3.5 do CE)	m²	3 640	1,10 €	4 004 €
I.7	**Camadas de misturas betuminosas a quente** e incluindo todos os trabalhos complementares	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.7.1	Fornecimento e aplicação de Betão Betuminoso, com espessura de mínima de 5,0 cm	m²	3 640	6,32 €	22 987 €
				TOTAL	57 211 €

EMPREITADA DE BENEFICIAÇÃO DO PAVIMENTO

Lista de Preços Unitários

Estrada da Liberdade

Solução Tradicional com betume "semi-modificado" com RAR

Código	Designação dos Trabalhos	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I	**Pavimentação** Trabalhos a realizar de acordo com o projecto e satisfazendo o especificado no Caderno de Encargos de Pavimentação, Controlo de Qualidade e Dossier de Exploração , considerando as espessuras das camadas após compactação, incluindo a preparação prévia do pavimento, o fornecimento dos materiais e as suas aplicações				
I.1	**Selagem de fissuras** com mastique betuminoso (Item 2.5.6.4 do CE), e incluindo todos os trabalhos complementares	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.1.1 e I.1.2	Fissuras longitudinais e obliquas localizadas nas vias e bermas e Fissuras Transversais	m	110	10,00 €	1 100,00 €
I.2	**Enchimento das fissuras muitos abertas** com areão lavado (tago de arroz) ou calda de cimento e com mastique betuminoso (Item 2.5.6.4 do CE), e incluindo todos os trabalhos complementares	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.2.1	Fissuras longitudinais	m	0	15,00 €	0,00 €
I.3	**Reparação de zonas localizadas** e incluindo todos os trabalhos complementares	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.3.1	Reparação de ninhos/esquinas partidas, incluindo delimitação da área a remendar, remoção dos materiais danificados, limpeza da área, fornecimento e aplicação de rega de colagem (item 1.1.3.5 do CE) e macadame betuminoso (tendo por base o Fuso A - item 1.11.1.1 do CE)	m^2	0	20,00 €	0,00 €
I.4	**Reparações Estruturais** e incluindo todos os trabalhos complementares (a verificar em obra)	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.4.1	Remoção por fresagem de camadas de pavimentos existentes (espessura mínima de 5.0cm), incluindo transporte a vazadouro e eventual indemnização a terceiros, limpeza da zonas fresada com escovas mecânicas e jacto de ar	m^2	0	8,00 €	0,00 €
I.4.2	Fornecimento e aplicação de rega de colagem modificada (item 1.1.3.5 do CE)		0	1,10 €	0,00 €
I.4.3	Fornecimento e aplicação de macadame betuminoso (tendo por base o Fuso A - item 1.11.1.1 do CE), com espessura de mínima de 6,0 cm		0	6,32 €	0,00 €
I.5	**Fresagem do pavimento existente** Incluindo limpezas, serragem, tratamento de juntas e transporte a vazadouro dos materiais sobrantes	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.5.1	Remoção por fresagem da camada de desgaste do pavimento existente (espessura mínima de 5.0cm), incluindo transporte a vazadouro e eventual indemnização a terceiros, limpeza da zonas fresada com escovas mecânicas e jacto de ar	m^2	3 640	8,00 €	29 120 €
I.6	**Rega de Colagem**	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.6.1	Aplicação da Rega Modificada (item 1.1.3.5 do CE)	m^2	3 640	1,10 €	4 004 €
I.7	**Camadas de misturas betuminosas a quente** e incluindo todos os trabalhos complementares	Unidade	Quantidade	Preços Unitários	Totais
I.7.1	Fornecimento e aplicação de Betão Betuminoso com betume "semi-modificado" com RAR, com espessura de mínima de 5.0 cm	m^2	3 640	6,80 €	24 749 €
				TOTAL	58 973 €

ANEXO X

PRODUÇÃO DE RUÍDO

AX.1. Contagem de tráfego

CONTAGEM DE TRÁFEGO									
POSTO		Estrada da Liberdade (descendente)							
	DATA	11/10/2017		DATA	12/10/2017		DATA	19/10/2017	
	Período	Ligeiros	Pesados	Período	Ligeiros	Pesados	Período	Ligeiros	Pesados
Sentido descendente	16:56 - 17:32	383	9	9:52 - 10:30	280	8	9:57 - 10:30	280	3
	TOTAL	392		TOTAL	288		TOTAL	283	
	22:18 - 22:55	65	0	22:11 - 22:55	69	0	22:31 - 22:56	70	0
	TOTAL	65		TOTAL	69		TOTAL	70	
	23:03 - 23:27	84	0	23:03 - 23:30	51	1	23:05 - 23:30	53	0
	TOTAL	84		TOTAL	52		TOTAL	53	
Sentido ascendente	16:56 - 17:32	511	3	9:52 - 10:30	260	8	9:57 - 10:30	236	9
	TOTAL	514		TOTAL	268		TOTAL	245	
	22:18 - 22:55	108	6	22:11 - 22:55	167	2	22:31 - 22:56	162	2
	TOTAL	114		TOTAL	169		TOTAL	164	
	23:03 - 23:27	95	2	23:03 - 23:30	117	2	23:05 - 23:30	104	2
	TOTAL	97		TOTAL	119		TOTAL	106	
Dois sentidos	16:56 - 17:32	894	12	9:52 - 10:30	540	16	9:57 - 10:30	516	12
	TOTAL	906		TOTAL	556		TOTAL	528	
	22:18 - 22:55	173	6	22:11 - 22:55	236	2	22:31 - 22:56	232	2
	TOTAL	179		TOTAL	238		TOTAL	234	
	23:03 - 23:27	179	2	23:03 - 23:30	168	3	23:05 - 23:30	157	2
	TOTAL	181		TOTAL	171		TOTAL	159	

Tabela 108 – Contagem de tráfego para aferir a produção de ruído no trecho piloto

AX.2. Relatório de ruído ambiente

LABORATÓRIO REGIONAL de ENGENHARIA CIVIL

N.º de relatório (004/ULAV/2017)

Ensaio de Ruído – E.R.115, perto da rotunda D. Francisco Santana

DEMC

11/2017

Região Autónoma da Madeira
Governo Regional

Secretaria Regional
dos Equipamentos e Infraestruturas

Índice

INTRODUÇÃO 1

CARATERIZAÇÃO DA FONTE E PONTOS DE MEDIÇÃO 2

Condições Atmosféricas 2

Localização do Recetor 3

Descrição da fonte de ruído 4

Sistema de Medição 5

METODOLOGIA, MEDIÇÕES E RESULTADOS 6

CONCLUSÕES 11

DEFINIÇÕES (REGULAMENTO GERAL DO RUÍDO – DECRETO-LEI Nº 9/2007 DE 17 DE JANEIRO) 12

Índice de Figuras

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA FONTE E DO RECETOR 2
FIGURA 2- LOCALIZAÇÃO DO RECETOR 3
FIGURA 3 - NÚMERO DE VEÍCULOS QUE TRANSITARAM DURANTE OS ENSAIOS NO DIA 11-10-2017 4
FIGURA 4- NÚMERO DE VEÍCULOS QUE TRANSITARAM DURANTE OS ENSAIOS DO DIA 12-10-2017 4
FIGURA 5-NÚMERO DE VEÍCULOS QUE TRANSITARAM DURANTE OS ENSAIOS DO DIA 19-10-2017 5
FIGURA 6 - VARIAÇÃO DE RUÍDO AO LONGO DO TEMPO NA AMOSTRA DIURNA DE 19-10-2017 6
FIGURA 7- VARIAÇÃO DE RUÍDO NA AMOSTRA DE ENTARDECER DE 19-10-2017 7
FIGURA 8- VARIAÇÃO DE RUÍDO NA AMOSTRA DA NOITE DE 19-10-2017 7
FIGURA 9- ANÁLISE ESPECTRAL DA AMOSTRA DIURNA DO DIA 19-10-2017 8
FIGURA 10-ANÁLISE ESPECTRAL DA AMOSTRA DE ENTARDECER DO DIA 19-10-2017 8
FIGURA 11 -ANÁLISE ESPECTRAL DA AMOSTRA DA NOITE DO DIA 19-10-2017 9
FIGURA 12- RESULTADOS DO DIA 11-10-2017 9
FIGURA 13- RESULTADOS DO DIA 12-10-2017 9
FIGURA 14- RESULTADOS DO DIA 19-10-2017 10
FIGURA 15- REGISTOS DE $L_{AEQ,T}$ EM CADA DIA POR PERÍODO EM DB (A) 11

Introdução

O presente trabalho do Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC, morada: Rua Agostinho Pereira de Oliveira, São Martinho, 9000-264 Funchal) destina-se a apresentar os ensaios de ruído ambiental provocado por veículos a transitarem na E.R.115, mais precisamente no trecho de ligação entre a rotunda D. Francisco Santana e o início da concessão da VIALITORAL, situada no Funchal.

As medições acústicas tiveram lugar nos dias 11, 12 e 19, entre as 10:00 e as 10:30, e entre as 22.30 e as 23.30 (com exceção no dia 11, em que em vez da primeiro ensaio iniciar às 10:00, iniciou às 17:00 e terminou às 17.30) e foram requeridas pela Universidade da Madeira (morada: Colégio dos Jesuítas, Rua dos Ferreiros, 9000-082 Funchal – Portugal), ao abrigo do protocolo desta entidade com o LREC.

O objetivo destes ensaios foi medir o ruído ambiental provocado por veículos a transitarem na E.R. 115.

Os ensaios foram programados para dias da semana típicos de tráfego rodoviário (i.e., de terça-feira, quarta-feira, e quinta-feira) e para as horas de elevada intensidade de trânsito, por forma a serem obtidos os registos máximos para todos os períodos de referência (diurno, entardecer e noturno).

Informa-se que a reprodução parcial deste documento é proibida, sem autorização deste Laboratório, e os Resultados dizem respeito às situações ensaiadas.

Caraterização da fonte e pontos de medição

Figura 1 - Localização da Fonte e do Recetor

Após uma análise prévia de reconhecimento às condicionantes da fonte e da zona a estudar, escolheu-se o local onde colocar o recetor (i.e., microfone).

As imediações da zona onde foi colocado o recetor são maioritariamente constituídas por betão (as paredes e passeios) e alcatrão (estradas e acessos rodoviários) que são considerados materiais refletores em termos de propagação acústica.

Condições Atmosféricas

As condições atmosféricas nos dias de medição foram de vento fraco (< 5 m/s), a temperatura do ar exterior foi de, entre 19 e 27 ºC e a humidade relativa esteve entre 50 a 70%.

As condições atmosféricas dos três dias na zona das medições apresentavam-se favoráveis à realização dos ensaios, pelo que procedeu-se às respetivas medições.

As condições meteorológicas não foram consideradas relevantes para a avaliação (C_{met}=0), dado que a condição $\frac{(hs+hr)}{r} \geq 0.1$, em que h_s (0,5m) é altura da fonte, h_r (4,2m) a altura do recetor e r (6 m) a distância entre a fonte e o recetor, é verdadeira.

Localização do Recetor

O recetor foi colocado sempre no mesmo local, nas coordenadas 3239.0451'N, 01655.5043'W, a uma altura de quatro metros e vinte centimetros, e localizava-se num passeio da E.R.115 (fonte) a uma altura de quatro metros (4,0m), distando cerca de seis metros ao eixo dessa via (6,0m), e a mais de três metros e meio (3,50m) de qualquer parede.

Em face do exposto, o recetor estava nas condições estabelecidas alínea a) do parágrafo 4 do Artigo 11º do Dec. Lei 9/2007.

O solo entre a fonte e o recetor era refletor.

O anemómetro e o Higrómetro do equipamento meteorológico AIRMAR 150WX foram colocados a 4.30m de altura.

Figura 2- Localização do recetor

O modo de proceder esteve de acordo, sempre que aplicável, com as especificações constantes da normalização portuguesa, nomeadamente NP ISO 1996-1:2011 e NP ISO 1996-2:2011 (Acústica: Descrição, Medição e Avaliação do Ruído Ambiente).

Descrição da fonte de ruído

O ruído é maioritariamente produzido pelos motores, pneus e pela deslocação dos veículos que transitam na E.R.115. É um ruído que tem alguma variação instantânea.

CONTAGEM DE TRÁFEGO			
DATA	11/10/2017		
Período avaliado	**Ligeiros**	**Pesados**	**Total**
16:56 - 17:32	894	12	906
22:18 - 22:55	173	6	179
23:03 - 23:27	179	2	181

Figura 3 - Número de veículos que transitaram durante os ensaios no dia 11-10-2017

CONTAGEM DE TRÁFEGO			
DATA	12/10/2017		
Período avaliado	**Ligeiros**	**Pesados**	**Total**
9:52 - 10:30	540	8+8	540
22:11 - 22:55	236	2	238
23:03 - 23:30	168	3	171

Figura 4- Número de veículos que transitaram durante os ensaios do dia 12-10-2017

CONTAGEM DE TRÁFEGO			
DATA	19/10/2017		
Período avaliado	**Ligeiros**	**Pesados**	**Total**
9:57 - 10:30	516	12	528
22:31 - 22:56	230	2	232
23:05 - 23:30	157	2	159

Figura 5-Número de veículos que transitaram durante os ensaios do dia 19-10-2017

Sistema de Medição

O sistema de medição utilizado na realização dos ensaios era constituído por um sonómetro e analisador acústico baseado em PC, e é composto pelos seguintes equipamentos:

- 2 Microfones GRAS modelo 40AF de ½";
- 2 Pré-amplificadores GRAS modelo 26AK de ½";
- Sonómetro Modelo Symphonie;
- Calibrador RION NC-74 (94dB @ 1KHz);
- Software dBTrig32, sonómetro tipo I, com análise de oitavas e terços de oitava em tempo real entre 50 Hz e 10KHz, registador e gravador de áudio, análise multiespectral e análise detalhada dos registos efetuados.

No dia 19 de outubro o Software foi programado para a aquisição por amostragem no período de referência no espectro de frequências de 50Hz a 10KHz em 1/3 de oitava em modo *fast* e *impulse*.

As diferenças dos níveis L_{eq} obtidos, nos dias das medições, em todos os períodos foram sempre inferiores a 5dB(A) pelo que não foi necessário repetir qualquer medição.

Só foram analisadas a impulsividade e a tonalidade do ruído no dia 19, devido a um erro de procedimento. Nesse ensaio não foram detetadas componentes tonais ou impulsivas.

No início e no fim de cada ensaio, foram registados os níveis sonoros produzidos com o calibrador RION NC-74 no microfone utilizado e os resultados entre os dois registos foram inferiores a 0.5dB, pelo que todas as medições efetuadas foram aceites.

Metodologia, medições e resultados

Em todas as medições (com a exceção mencionada em "Sistema de Medição"), sempre que aplicável foi seguida a metodologia prevista na diretiva "Procedimentos Específicos de Medição de Ruído Ambiente" de Abril de 2003, do Ministério do Ambiente e na norma Portuguesa NP 1730, norma NP ISO 1996-1:2011 e NP ISO 1996-2:2011.

Foram recolhidas amostras de som no local determinado para análise como representativas dos recetores potencialmente afetados pela incomodidade e/ou exposição máxima provocada pelas emissões acústicas associadas ao ruído ambiente existente na zona.

Em seguida apresenta-se os resultados fornecidos pelo programa DBTrig.

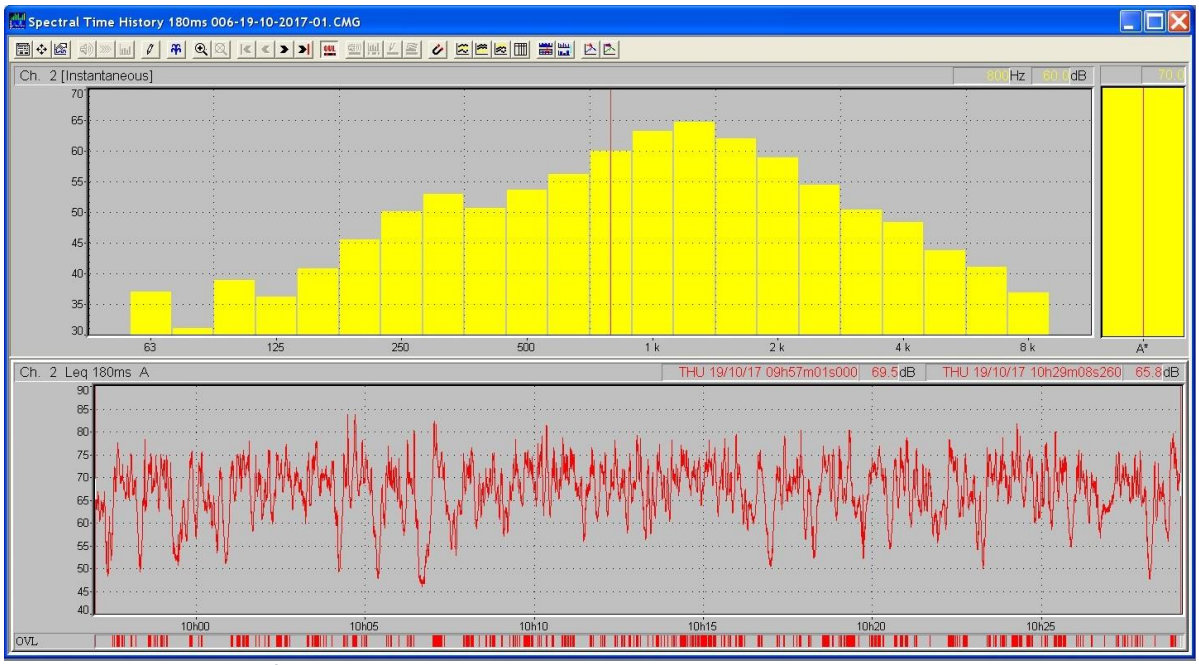


Figura 6 - variação de ruído ao longo do tempo na amostra diurna de 19-10-2017

Salienta-se que o espectro de frequências apresentado nas figuras 6, 7 e 8 (variação de ruído ao longo do tempo) é um exemplo instantâneo escolhido pelo *software* DBTrig.

Figura 7- variação de ruído na amostra de entardecer de 19-10-2017

Figura 8- variação de ruído na amostra da noite de 19-10-2017

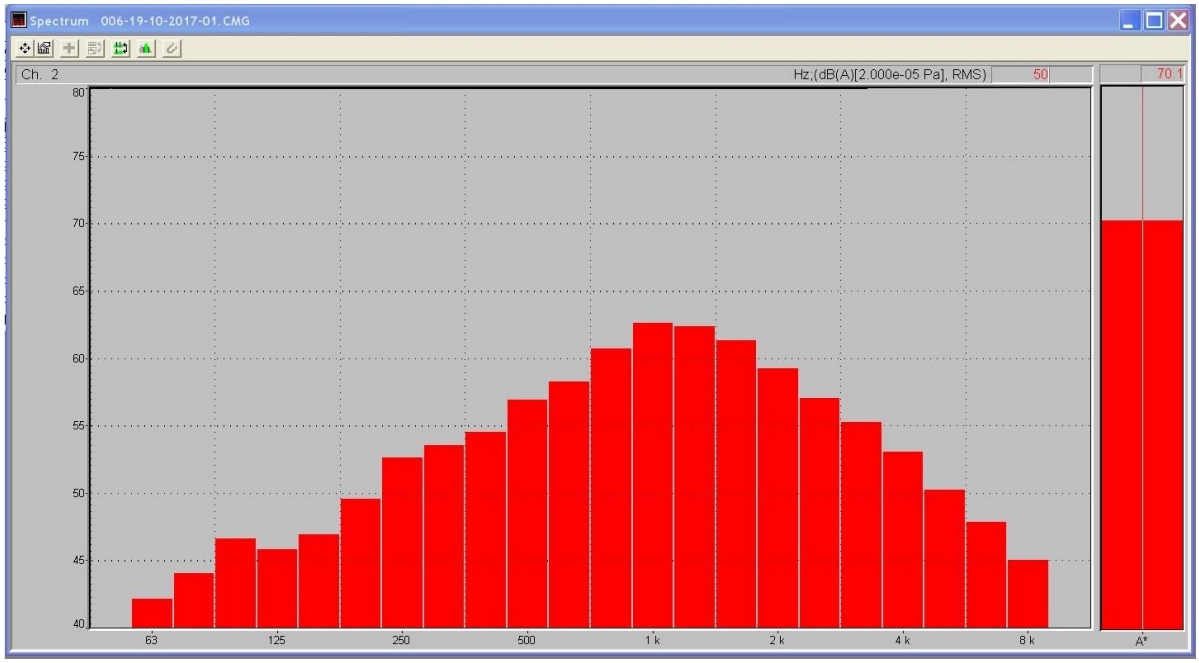


Figura 9- análise espectral da amostra diurna do dia 19-10-2017

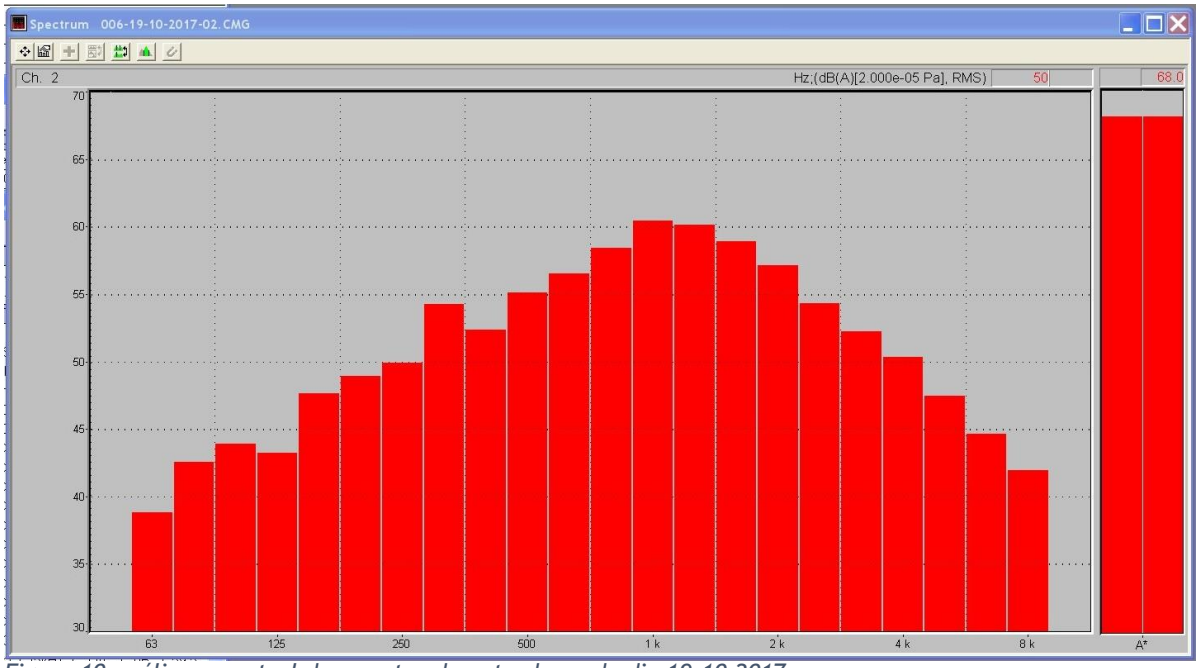


Figura 10-análise espectral da amostra de entardecer do dia 19-10-2017

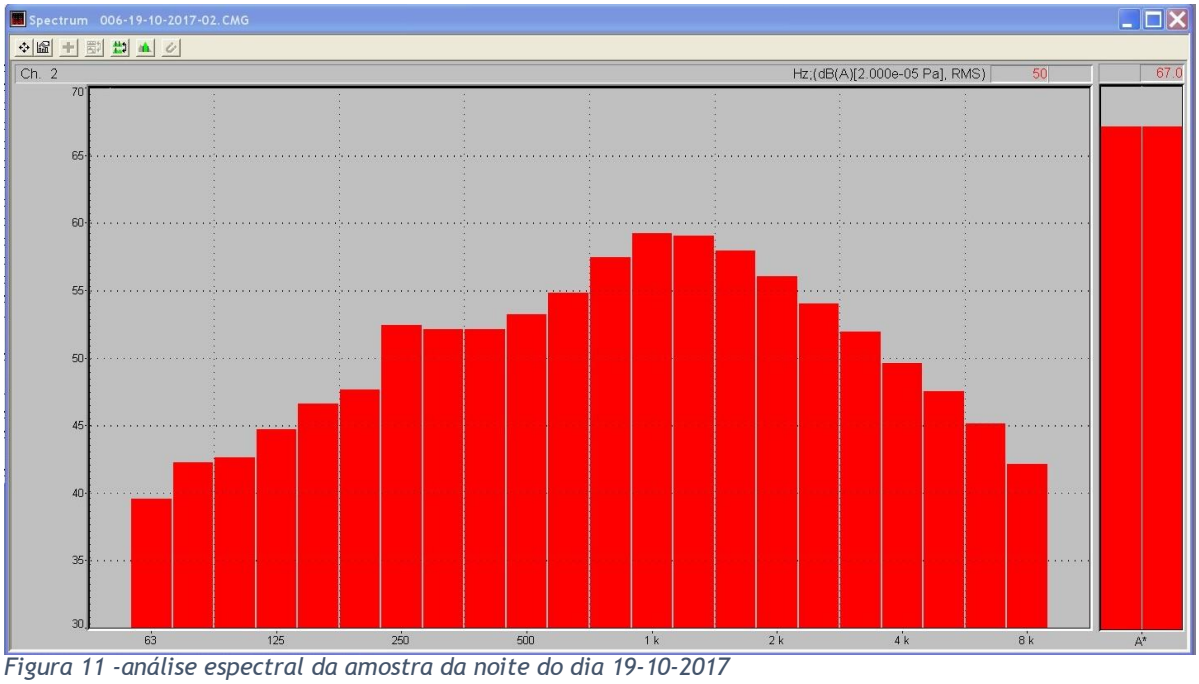


Figura 11 -análise espectral da amostra da noite do dia 19-10-2017

Overall Leq and Ln Table 006-11-10-...

File	006-11-10-2017-01.CMG					
Start	11-10-17 16:56:15:000					
End	11-10-17 17:31:57:400					
Channel	Type	Wght	Unit	Leq	Lmin	Lmax
Ch. 1	Leq	A	dB	72,1	50,8	92,4

Overall Leq and Ln Table 006-11-10-2...

File	006-11-10-2017-02.CMG					
Start	11-10-17 22:18:59:000					
End	11-10-17 22:55:05:800					
Channel	Type	Wght	Unit	Leq	Lmin	Lmax
Ch. 2	Leq	A	dB	73,1	43,2	106,6

Overall Leq and Ln Table 006-11-10-...

File	006-11-10-2017-02.CMG					
Start	11-10-17 23:02:59:000					
End	11-10-17 23:27:05:800					
Channel	Type	Wght	Unit	Leq	Lmin	Lmax
Ch. 2	Leq	A	dB	69,2	42,1	92,4

Figura 12- Resultados do dia 11-10-2017

Overall Leq and Ln Table 006-12-10-...

File	006-12-10-2017-01.CMG					
Start	12-10-17 09:52:18:000					
End	12-10-17 10:30:18:600					
Channel	Type	Wght	Unit	Leq	Lmin	Lmax
Ch. 2	Leq	A	dB	71,0	48,8	89,1

Overall Leq and Ln Table 006-12-10-...

File	006-12-10-2017-02.CMG					
Start	12-10-17 22:11:29:000					
End	12-10-17 22:55:02:000					
Channel	Type	Wght	Unit	Leq	Lmin	Lmax
Ch. 2	Leq	A	dB	69,1	43,6	92,4

Overall Leq and Ln Table 006-12-10-...

File	006-12-10-2017-02.CMG					
Start	12-10-17 23:03:29:000					
End	12-10-17 23:30:02:000					
Channel	Type	Wght	Unit	Leq	Lmin	Lmax
Ch. 2	Leq	A	dB	73,2	44,6	99,0

Figura 13- Resultados do dia 12-10-2017

Overall Leq and Ln Table 006-19-10-2017-01.CMG

File	006-19-10-2017-01.CMG					
Start	19-10-17 09:57:01:000					
End	19-10-17 10:29:08:320					
Channel	Type	Wght	Unit	Leq	Lmin	Lmax
Ch. 2	Leq	A	dB	70,1	45,3	84,3
Ch. 2	Slow	A	dB	70,1	46,8	82,5
Ch. 2	Fast	A	dB	70,1	46,2	83,9
Ch. 2	Impuls	A	dB	72,3	47,8	84,7
Ch. 2	1/3 Oct 63Hz	Lin	dB	68,5	41,4	86,8
Ch. 2	1/3 Oct 80Hz	Lin	dB	66,6	41,2	88,8
Ch. 2	1/3 Oct 100Hz	Lin	dB	65,9	39,6	87,5
Ch. 2	1/3 Oct 125Hz	Lin	dB	62,0	37,6	83,8
Ch. 2	1/3 Oct 160Hz	Lin	dB	60,3	36,5	80,8
Ch. 2	1/3 Oct 200Hz	Lin	dB	60,4	38,0	79,7
Ch. 2	1/3 Oct 250Hz	Lin	dB	61,3	37,8	83,1
Ch. 2	1/3 Oct 315Hz	Lin	dB	60,1	38,1	79,6
Ch. 2	1/3 Oct 400Hz	Lin	dB	59,3	36,6	78,5
Ch. 2	1/3 Oct 500Hz	Lin	dB	60,1	37,6	81,8
Ch. 2	1/3 Oct 630Hz	Lin	dB	60,1	36,1	74,8
Ch. 2	1/3 Oct 800Hz	Lin	dB	61,5	37,1	75,5
Ch. 2	1/3 Oct 1kHz	Lin	dB	62,6	36,3	74,2
Ch. 2	1/3 Oct 1.25kHz	Lin	dB	61,7	34,8	76,7
Ch. 2	1/3 Oct 1.6kHz	Lin	dB	60,3	32,5	77,5
Ch. 2	1/3 Oct 2kHz	Lin	dB	58,0	30,9	73,4
Ch. 2	1/3 Oct 2.5kHz	Lin	dB	55,7	28,2	72,2
Ch. 2	1/3 Oct 3.15kHz	Lin	dB	54,0	25,6	71,8
Ch. 2	1/3 Oct 4kHz	Lin	dB	52,0	23,2	71,1
Ch. 2	1/3 Oct 5kHz	Lin	dB	49,7	19,0	67,8
Ch. 2	1/3 Oct 6.3kHz	Lin	dB	47,9	15,6	65,7
Ch. 2	1/3 Oct 8kHz	Lin	dB	46,1	12,7	63,8

Overall Leq and Ln Table 006-19-10-2017-02.CMG

File	006-19-10-2017-02.CMG					
Start	19-10-17 22:31:15:000					
End	19-10-17 22:56:11:820					
Channel	Type	Wght	Unit	Leq	Lmin	Lmax
Ch. 2	Leq	A	dB	68,0	41,4	83,8
Ch. 2	Slow	A	dB	68,0	43,2	80,4
Ch. 2	Fast	A	dB	68,0	42,6	82,7
Ch. 2	Impuls	A	dB	70,7	43,7	83,9
Ch. 2	1/3 Oct 63Hz	Lin	dB	65,2	37,8	83,8
Ch. 2	1/3 Oct 80Hz	Lin	dB	65,1	36,1	85,2
Ch. 2	1/3 Oct 100Hz	Lin	dB	63,2	36,2	86,6
Ch. 2	1/3 Oct 125Hz	Lin	dB	59,4	30,1	82,0
Ch. 2	1/3 Oct 160Hz	Lin	dB	61,0	33,6	86,7
Ch. 2	1/3 Oct 200Hz	Lin	dB	59,8	34,0	86,4
Ch. 2	1/3 Oct 250Hz	Lin	dB	58,6	32,7	79,5
Ch. 2	1/3 Oct 315Hz	Lin	dB	60,8	33,2	85,7
Ch. 2	1/3 Oct 400Hz	Lin	dB	57,1	32,4	79,1
Ch. 2	1/3 Oct 500Hz	Lin	dB	58,3	33,5	82,8
Ch. 2	1/3 Oct 630Hz	Lin	dB	58,4	33,6	79,4
Ch. 2	1/3 Oct 800Hz	Lin	dB	59,2	33,5	75,7
Ch. 2	1/3 Oct 1kHz	Lin	dB	60,4	33,3	75,1
Ch. 2	1/3 Oct 1.25kHz	Lin	dB	59,5	31,5	76,9
Ch. 2	1/3 Oct 1.6kHz	Lin	dB	57,9	29,9	72,2
Ch. 2	1/3 Oct 2kHz	Lin	dB	55,9	25,6	78,3
Ch. 2	1/3 Oct 2.5kHz	Lin	dB	53,0	22,1	70,3
Ch. 2	1/3 Oct 3.15kHz	Lin	dB	51,0	18,2	70,4
Ch. 2	1/3 Oct 4kHz	Lin	dB	49,3	15,0	73,6
Ch. 2	1/3 Oct 5kHz	Lin	dB	46,9	12,1	70,8
Ch. 2	1/3 Oct 6.3kHz	Lin	dB	44,7	9,4	70,0
Ch. 2	1/3 Oct 8kHz	Lin	dB	43,0	8,2	67,0

Overall Leq and Ln Table 006-19-10-2017-02.CMG

File	006-19-10-2017-02.CMG					
Start	19-10-17 23:05:15:000					
End	19-10-17 23:30:11:820					
Channel	Type	Wght	Unit	Leq	Lmin	Lmax
Ch. 2	Leq	A	dB	67,0	40,3	84,0
Ch. 2	Slow	A	dB	67,0	41,3	82,0
Ch. 2	Fast	A	dB	67,0	40,8	83,6
Ch. 2	Impuls	A	dB	69,8	42,0	84,8
Ch. 2	1/3 Oct 63Hz	Lin	dB	65,9	39,2	86,9
Ch. 2	1/3 Oct 80Hz	Lin	dB	64,8	35,3	85,3
Ch. 2	1/3 Oct 100Hz	Lin	dB	61,9	36,8	83,3
Ch. 2	1/3 Oct 125Hz	Lin	dB	60,9	31,9	86,2
Ch. 2	1/3 Oct 160Hz	Lin	dB	60,0	32,3	83,6
Ch. 2	1/3 Oct 200Hz	Lin	dB	58,5	33,8	79,9
Ch. 2	1/3 Oct 250Hz	Lin	dB	61,1	33,6	87,2
Ch. 2	1/3 Oct 315Hz	Lin	dB	58,7	33,1	80,0
Ch. 2	1/3 Oct 400Hz	Lin	dB	56,9	31,2	75,8
Ch. 2	1/3 Oct 500Hz	Lin	dB	56,4	32,5	74,7
Ch. 2	1/3 Oct 630Hz	Lin	dB	56,7	31,6	73,9
Ch. 2	1/3 Oct 800Hz	Lin	dB	58,2	31,7	76,2
Ch. 2	1/3 Oct 1kHz	Lin	dB	59,2	31,9	76,2
Ch. 2	1/3 Oct 1.25kHz	Lin	dB	58,4	29,9	73,2
Ch. 2	1/3 Oct 1.6kHz	Lin	dB	56,9	27,9	73,5
Ch. 2	1/3 Oct 2kHz	Lin	dB	54,8	25,0	72,4
Ch. 2	1/3 Oct 2.5kHz	Lin	dB	52,7	21,0	72,5
Ch. 2	1/3 Oct 3.15kHz	Lin	dB	50,7	17,4	72,3
Ch. 2	1/3 Oct 4kHz	Lin	dB	48,6	14,4	69,8
Ch. 2	1/3 Oct 5kHz	Lin	dB	47,0	12,4	72,3
Ch. 2	1/3 Oct 6.3kHz	Lin	dB	45,2	10,1	70,4
Ch. 2	1/3 Oct 8kHz	Lin	dB	43,2	8,6	68,8

Figura 14- Resultados do dia 19-10-2017

Conclusões

O ruído produzido pelo trânsito de veículos na E.R. 155 não é tonal nem impulsivo.

Os registos de $L_{Aeq,t}$ medidos são apresentados na figura seguinte.

	Período		
	Diurno	Entardecer	Noturno
11/10/2017	72	73	69
12/10/2017	71	69	73
19/10/2017	70	68	67

Figura 15- Registos de $L_{Aeq,t}$ em cada dia por período em dB (A)

Utilizou-se a equação 6 (média logarítmica) do "Guia prático para medições de ruído ambiente - no contexto do Regulamento Geral do Ruído tendo em conta a NP ISO 1996":

$$LAeq,T = 10 \times \log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} 10^{(LAeq,t)_i/10}\right)$$

onde, n é o número de medições, $(L_{Aeq,t})_i$ é o valor do nível sonoro correspondente à medição i.

obtém-se que L_d é 71 dB (A), L_e é 71 dB (A) e L_n é 71 dB (A).

Utilizando a equação mencionada na alínea j) do artigo 3º do – Decreto-Lei nº 9/2007 de 17 de Janeiro, obtém-se que o Indicador de ruído diurno-entardecer-noturno (L_{den}) é: 77 dB (A).

Estes registos são superiores em cerca de 5 dB (A)) aos indicados para aquela zona para os indicadores L_{den} e L_n no Mapa de Ruído do Funchal, disponível no sítio eletrónico dessa edilidade.

Funchal, 14 de novembro de 2017.

Autoria	**Visto**	**Visto**
O técnico superior	O Chefe da ULAV	O Diretor do DEM
_____	_____	_____
Miguel Câncio de Jesus e Silva	José Carlos Fernandes Neves	Luís Miguel Gouveia Correia

Definições (Regulamento Geral do Ruído – Decreto-Lei nº 9/2007 de 17 de Janeiro)

Artigo 1.º

Objeto

O presente Regulamento estabelece o regime de prevenção e controlo da poluição sonora, visando a salvaguarda da saúde humana e o bem-estar das populações.

Artigo 2.º

Âmbito

1—O presente Regulamento aplica-se às atividades ruidosas permanentes e temporárias e a outras fontes de ruído suscetíveis de causar incomodidade, designadamente:

a) Construção, reconstrução, ampliação, alteração ou conservação de edificações;

b) Obras de construção civil;

c) Laboração de estabelecimentos industriais, comerciais e de serviços;

d) Equipamentos para utilização no exterior;

….

Artigo 3.º

Definições

Para efeitos do presente Regulamento, entende-se por:

a) «Atividade ruidosa permanente» a atividade desenvolvida com carácter permanente, ainda que sazonal, que produza ruído nocivo ou incomodativo para quem habite ou permaneça em locais onde se fazem sentir os efeitos dessa fonte de ruído, designadamente laboração de estabelecimentos industriais, comerciais e de serviços;

b) «Atividade ruidosa temporária» a atividade que, não constituindo um ato isolado, tenha carácter não permanente e que produza ruído nocivo ou incomodativo para quem habite ou permaneça em

locais onde se fazem sentir os efeitos dessa fonte de ruído tais como obras de construção civil, competições desportivas, espetáculos, festas ou outros divertimentos, feiras e mercados;

c) «Avaliação acústica» a verificação da conformidade de situações específicas de ruído com os limites fixados;

d) «Fonte de ruído» a ação, atividade permanente ou temporária, equipamento, estrutura ou infraestrutura que produza ruído nocivo ou incomodativo para quem habite ou permaneça em locais onde se faça sentir o seu efeito;

…

i) «Indicador de ruído» o parâmetro físico-matemático para a descrição do ruído ambiente que tenha uma relação

com um efeito prejudicial na saúde ou no bem-estar humano;

j) «Indicador de ruído diurno-entardecer-noturno (Lden)» o indicador de ruído, expresso em dB(A), associado ao incómodo global, dado pela expressão:

l) «Indicador de ruído diurno (Ld) ou (Lday)» o nível sonoro médio de longa duração, conforme definido na Norma NP 1730-1:1996, ou na versão atualizada correspondente, determinado durante uma série de períodos diurnos representativos de um ano;

m) «Indicador de ruído do entardecer (Le) ou (Levening)» o nível sonoro médio de longa duração, conforme definido na Norma NP 1730-1:1996, ou na versão atualizada correspondente, determinado durante uma série de períodos do entardecer representativos de um ano;

n) «Indicador de ruído noturno (Ln) ou (Lnight)» o nível sonoro médio de longa duração, conforme definido na Norma NP 1730-1:1996, ou na versão atualizada correspondente, determinado durante uma série de períodos noturnos representativos de um ano;

…

p) «Período de referência» o intervalo de tempo a que se refere um indicador de ruído, de modo a abranger as atividades humanas típicas, delimitado nos seguintes termos:

i) Período diurno—das 7 às 20 horas;

ii) Período do entardecer—das 20 às 23 horas;

iii) Período noturno—das 23 às 7 horas;

q) «Recetor sensível» o edifício habitacional, escolar, hospitalar ou similar ou espaço de lazer, com utilização humana;

r) «Ruído de vizinhança» o ruído associado ao uso habitacional e às atividades que lhe são inerentes, produzido

diretamente por alguém ou por intermédio de outrem, por coisa à sua guarda ou animal colocado sob a sua responsabilidade, que, pela sua duração, repetição ou intensidade, seja suscetível de afetar a saúde pública ou a tranquilidade da vizinhança;

s) «Ruído ambiente» o ruído global observado numa dada circunstância num determinado instante, devido ao conjunto das fontes sonoras que fazem parte da vizinhança próxima ou longínqua do local considerado;

t) «Ruído particular» o componente do ruído ambiente que pode ser especificamente identificada por meios acústicos e atribuída a uma determinada fonte sonora;

u) «Ruído residual» o ruído ambiente a que se suprimem um ou mais ruídos particulares, para uma situação determinada;

v) «Zona mista» a área definida em plano municipal de ordenamento do território, cuja ocupação seja afeta

a outros usos, existentes ou previstos, para além dos referidos na definição de zona sensível;

x) «Zona sensível» a área definida em plano municipal de ordenamento do território como vocacionada para uso habitacional, ou para escolas, hospitais ou similares, ou espaços de lazer, existentes ou previstos, podendo conter pequenas unidades de comércio e de serviços destinadas a servir a população local, tais como cafés e outros estabelecimentos de restauração, papelarias e outros estabelecimentos de comércio tradicional, sem funcionamento no período noturno;

…

Artigo 11.º

Valores limite de exposição

1—Em função da classificação de uma zona como mista ou sensível, devem ser respeitados os seguintes valores limite de exposição:

a) As zonas mistas não devem ficar expostas a ruído ambiente exterior superior a 65 dB(A), expresso pelo indicador Lden, e superior a 55 dB(A), expresso pelo indicador Ln;

b) As zonas sensíveis não devem ficar expostas a ruído ambiente exterior superior a 55 dB(A), expresso pelo indicador Lden, e superior a 45 dB(A), expresso pelo indicador Ln;

c) As zonas sensíveis em cuja proximidade exista em exploração, à data da entrada em vigor do presente Regulamento, uma grande infraestrutura de transporte não devem ficar expostas a ruído ambiente exterior superior a 65 dB(A), expresso pelo indicador Lden, e superior a 55 dB(A), expresso pelo indicador Ln;

d) As zonas sensíveis em cuja proximidade esteja projetada, à data de elaboração ou revisão do plano municipal de ordenamento do território, uma grande infraestrutura de transporte aéreo não devem ficar expostas a ruído ambiente exterior superior a 65 dB(A), expresso pelo indicador Lden, e superior a 55 dB(A), expresso pelo indicador Ln;

e) As zonas sensíveis em cuja proximidade esteja projetada, à data de elaboração ou revisão do plano municipal

de ordenamento do território, uma grande infraestrutura de transporte que não aéreo não devem ficar expostas a ruído ambiente exterior superior a 60 dB(A), expresso pelo indicador Lden, e superior a 50 dB(A), expresso pelo indicador Ln.

2—Os recetores sensíveis isolados não integrados em zonas classificadas, por estarem localizados fora dos perímetros urbanos, são equiparados, em função dos usos existentes na sua proximidade, a zonas sensíveis ou mistas, para efeitos de aplicação dos correspondentes valores limite fixados no presente artigo.

3—Até à classificação das zonas sensíveis e mistas a que se referem os n.os 2 e 3 do artigo 6.º, para efeitos

de verificação do valor limite de exposição, aplicam-se aos recetores sensíveis os valores limite de Lden igual ou inferior a 63 dB(A) e Ln igual ou inferior a 53 dB(A).

4—Para efeitos de verificação de conformidade dos valores fixados no presente artigo, a avaliação deve ser efetuada junto do ou no recetor sensível, por uma das seguintes formas:

a) Realização de medições acústicas, sendo que os pontos de medição devem, sempre que tecnicamente possível, estar afastados, pelo menos, 3,5 m de qualquer estrutura refletora, à exceção do solo, e situar-se a uma altura de 3,8 m a 4,2 m acima do solo, quando aplicável, ou de 1,2 m a 1,5 m de altura acima do solo ou do nível de cada piso de interesse, nos restantes casos;

…

Artigo 13.º

Atividades ruidosas permanentes

1—A instalação e o exercício de atividades ruidosas permanentes em zonas mistas, nas envolventes das zonas sensíveis ou mistas ou na proximidade dos recetores sensíveis isolados estão sujeitos:

a) Ao cumprimento dos valores limite fixados no artigo 11.º; e

b) Ao cumprimento do critério de incomodidade, considerado como a diferença entre o valor do indicador LAeq do ruído ambiente determinado durante a ocorrência do ruído particular da atividade ou atividades em avaliação e o valor do indicador LAeq do ruído residual, diferença que não pode exceder 5 dB(A) no período diurno, 4 dB(A) no período do entardecer e 3 dB(A) no período noturno, nos termos do anexo I ao presente Regulamento, do qual faz parte integrante.

….

5—O disposto na alínea b) do n.º 1 não se aplica, em qualquer dos períodos de referência, para um valor do indicador LAeq do ruído ambiente no exterior igual ou inferior a 45 dB(A) ou para um valor do indicador LAeq do ruído ambiente no interior dos locais de receção igual ou inferior a 27 dB(A), considerando o estabelecido nos n.ºs 1 e 4 do anexo I.

…

ANEXO I

(a que se refere o artigo 13.º)

Parâmetros para a aplicação do critério de incomodidade

1—O valor do LAeq do ruído ambiente determinado durante a ocorrência do ruído particular deve ser corrigido de acordo com as características tonais ou impulsivas do ruído particular, passando a designar-se por nível de avaliação, LAr , aplicando a seguinte fórmula: LAr=LAeq+K1+K2 em que K1 é a correção tonal e K2 é a correção impulsiva. Estes valores são K1=3 dB(A) ou K2=3 dB(A) se for detetado que as componentes tonais ou impulsivas, respetivamente, são características específicas do ruído particular, ou são K1=0 dB(A) ou K2=0 dB(A) se estas componentes não forem identificadas. Caso se verifique a coexistência de componentes tonais e impulsivas a correção a adicionar é de K1+K2=6 dB(A). O método para detetar as características tonais do ruído dentro do intervalo de tempo de avaliação, consiste em verificar, no espectro de um terço de oitava, se o nível sonoro de uma banda excede o das adjacentes em 5 dB(A) ou mais, caso em que o ruído deve ser considerado tonal. O método para detetar as características impulsivas do ruído dentro do intervalo de tempo de avaliação, consiste em determinar a diferença entre o nível sonoro contínuo equivalente, LAeq , medido em simultâneo com característica impulsiva e fast. Se esta diferença for superior a 6 dB(A), o ruído deve ser considerado impulsivo.