



Correção das deflexões obtidas com defletómetro
de impacto devido às variações de temperatura

UMinho | 2013



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Sara Isabel Rodrigues Amorim

Correção das deflexões obtidas com
defletómetro de impacto devido
às variações de temperatura

Julho de 2013



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Sara Isabel Rodrigues Amorim

Correção das deflexões obtidas com
defletómetro de impacto devido
às variações de temperatura

Tese de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Jorge Carvalho Pais
e da
Professora Doutora Arminda Manuela Andrade Pereira
Gonçalves

Julho de 2013

AGRADECIMENTOS

O trabalho de dissertação de mestrado do Mestrado Integrado em Engenharia Civil foi feito sob orientação do Professor Jorge Carvalho Pais, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil e da Professora Arminda Manuela Andrade Pereira Gonçalves, Professora Auxiliar do Departamento de Matemática e Aplicações da Universidade do Minho.

Ao Professor Jorge Carvalho Pais expesso o meu agradecimento por todo o apoio e orientação prestada no desenvolvimento do trabalho. Agradeço a disponibilidade, interesse e incentivo.

À Professora Arminda Manuela Andrade Pereira Gonçalves agradeço pelos esclarecimentos, disponibilidade e análises críticas, que em muito contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Engenheiro Carlos Palha, responsável do laboratório de Vias de Comunicação da Universidade do Minho agradeço pelos conselhos, disponibilidade e esclarecimentos.

Ao Hélder Torres, técnico do laboratório de Vias de Comunicação da Universidade do Minho e amigo, expesso o meu agradecimento pelo apoio, troca de ideias e incentivo.

Aos meus Amigos agradeço pela companhia e pelos bons momentos que deixarão saudades.

Aos meus Pais e Irmãos agradeço o investimento na minha formação, o constante incentivo e apoio, paciência e compreensão demonstrados ao longo destes anos.

Ao Miguel agradeço pela presença permanente, compreensão e incentivo que em muito contribuíram para chegar ao final desta jornada.

Ao Alexandre, por olhar por mim.

RESUMO

O desenvolvimento da rede rodoviária das últimas décadas obriga a que, atualmente, haja a preocupação na sua conservação e reabilitação. De forma a saber a real necessidade de reabilitação dos pavimentos é imprescindível a avaliação da sua capacidade de carga que pode ser conseguida através de parâmetros como a deflexão, com a qual se obtém o módulo de rigidez das camadas dos pavimentos. A análise e comparação entre estes parâmetros só é possível se corresponderem à mesma temperatura. Assim, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de modelos para correção da deflexão do pavimento a determinada temperatura, para uma temperatura de referência e de modelos para a correção do módulo de rigidez para as mesmas condições, em função da mistura betuminosa.

A deflexão dos pavimentos pode ser determinada recorrendo a vários equipamentos de ensaio sendo o defletómetro de impacto (FWD) um dos mais utilizados nos últimos anos, equipamento que permite a obtenção de deflexões a várias distâncias da aplicação de uma carga. Com estes dados e através do processo de análise inversa é possível a obtenção do módulo de rigidez das diferentes camadas dos pavimentos.

O presente estudo centra-se essencialmente em três partes: uma avaliação em laboratório, onde é feito um estudo dos módulos de rigidez de várias misturas betuminosas; uma avaliação *in situ* onde são determinadas as deflexões de quatro pavimentos utilizando o defletómetro de impacto; e uma modelação numérica que permite através do *software JPav2.1* obter as deflexões dos pavimentos arbitrados. Com os dados da modelação numérica e os dados obtidos nas restantes fases do trabalho são obtidos modelos de correção das deflexões, sendo sugerido ainda um modelo através da utilização de redes neuronais artificiais.

PALAVRAS CHAVE: Deflexão; Módulo de Rigidez; Temperatura; Defletómetro de Impacto; Análise Inversa.

ABSTRACT

The development of the highway system carried out during the last decades requires a concern on its conservation and rehabilitation. In order to define the pavement rehabilitation, the assessment of the structural capacity of the pavement is indispensable which can be done measuring the pavement deflection which is used to obtain the stiffness modulus of pavement layers. The analysis and comparison of these parameters is only possible for the same pavement temperature. Thus, the objective of this work is the development of models to correct the deflection at testing temperature to a reference temperature and the development of models to correct the stiffness modulus in same conditions.

The pavement deflection can be measured with several test equipments, including the Falling Weight Deflectometer (FWD), one of the most used equipments in the past few years. This equipment makes possible the evaluation of the pavement deflection at several distances from the load application. With these deflections and pavement characteristics, a back-analysis can be performed to obtain stiffness modulus of the different layers of the pavement.

The present study concentrates essentially in three points: laboratory evaluation, where the stiffness modulus of different asphalt mixtures is assessed; evaluation *in situ*, where the pavement deflections of three trial sections are obtained using falling weight deflectometer measurements; and numerical modeling where pavement deflection is obtained using the JPav software. The data obtained in the numerical modeling, supported with the data of the other phases of the work, allowed to develop models to correct pavement deflection to a reference temperature. Moreover, neural networks were used to develop a model to correct the pavement deflection.

KEYWORDS

Deflection; Stiffness Modulus; Temperature; Falling Weight Deflectometer; Back-Analysis.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento temático	1
1.2	Objetivos do trabalho	3
1.3	Organização da dissertação	5
2	Estado da Arte.....	7
2.1	Dimensionamento e reabilitação de pavimentos	7
2.2	Avaliação da capacidade de carga dos pavimentos	10
2.2.1	Determinação das deflexões do pavimento.....	10
2.2.2	Definição dos módulos de rigidez	14
2.3	Correção dos módulos de rigidez	18
2.4	Correção das deflexões do pavimento	27
2.5	Redes Neurais Artificiais (RNA).....	43
3	Metodologia de trabalho	49
3.1	Avaliação em laboratório	49
3.2	Modelação numérica	59
3.3	Avaliação <i>in situ</i>	61
4	Resultados.....	67
4.1	Avaliação laboratorial da rigidez das misturas betuminosas	67
4.1.1	Mistura AC14.....	72
4.1.2	Mistura AC16	76
4.1.3	Mistura AC20	80
4.2	Modelo de correção das deflexões.....	85
4.2.1	Modelo de correção para E=20 MPa	95
4.2.2	Modelo de correção para E=40 MPa	97

4.2.3	Modelo de correção para E=60 MPa	98
4.2.4	Modelo de correção para E=80 MPa	99
4.2.5	Modelo de correção para E=100 MPa	100
4.2.6	Modelo de correção para E=120 MPa	101
4.2.7	Modelo de correção das deflexões.....	102
4.3	Avaliação da capacidade de carga	107
4.3.1	Resultados dos ensaios com defletómetro de impacto.....	107
4.3.2	Análise inversa	111
4.4	Aplicação do modelo às condições estudadas <i>in situ</i>	118
4.5	Redes Neurais Artificiais.....	122
4.5.1	Considerações iniciais.....	122
4.5.2	Modelo de previsão do rácio da deflexão	124
4.6	Modelo de correção das deflexões excluindo o módulo de rigidez da fundação.....	129
4.7	Comparação dos modelos de correção com e sem a inclusão do rácio da deflexão	132
5	Conclusões.....	135
5.1	Conclusões gerais	135
5.2	Trabalhos futuros.....	137
6	Referências Bibliográficas.....	139

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Constituição e solicitações de um pavimento flexível (Branco et al., 2011)	8
Figura 2.2 – Defletómetro de Impacto	11
Figura 2.3 – Representação do defletómetro de impacto e zonas de tensão (Freitas 1999)	12
Figura 2.4 – Curva mestra (Pais & Pereira, 2002).....	16
Figura 2.5 – Ábaco para determinação do fator corretivo (AASHTO, 1993).....	20
Figura 2.6 – Relação do módulo com a temperatura a meio da camada.....	22
Figura 2.7 – Fator de ajuste da temperatura (AASHTO, 1993)	28
Figura 2.8 – Ábacos para determinação do fator corretivo (SHRP, 1993)	30
Figura 2.9 – Ábaco para determinação do fator de ajuste (Asphalt Institute, 1983)	31
Figura 2.10 – Fator de normalização da temperatura (Van Gurp, 1995)	32
Figura 2.11 – Coeficientes de normalização (Van Gurp 1995).....	32
Figura 2.12 – Relação temperatura do pavimento e deflexão	35
Figura 2.13 – Variação do fator corretivo com a temperatura para a secção 1	37
Figura 2.14 – Fatores de ajuste da temperatura para defl ₃₆ = 100µm e 40° de latitude ..	42
Figura 2.15 – Diferentes tipos e arquiteturas de rede (Jain & Mao, 1996)	45
Figura 2.16 – Exemplo de rede <i>multilayer perceptron</i> (Nunes, 2003)	46
Figura 3.1 – Curva granulométrica da mistura AC14.....	50
Figura 3.2 – Curva granulométrica da mistura AC16.....	51
Figura 3.3 – Curva granulométrica da mistura AC20.....	51
Figura 3.4 – Introdução do betume na mistura de agregados.....	54
Figura 3.5 – Mistura de betume e agregados.....	54
Figura 3.6 – Molde e cilindro de rolos de rasto liso	55
Figura 3.7 – Mistura no molde depois da compactação.....	55
Figura 3.8 – Provetes das três misturas: AC14, AC16 e AC20.....	56
Figura 3.9 – Esquema de apoios ensaio de módulo de rigidez (Pais et al., 2000).....	57
Figura 3.10 – Equipamento servo-hidráulico para realização dos ensaios de módulo de rigidez.....	58
Figura 3.11 – Dispositivo de flexão em 4 pontos e introdução do provete para ensaio .	58
Figura 3.12 – Aspeto do <i>software</i> de cálculo JPav 2.1	59

Figura 3.13 – Introdução da glicerina para medição da temperatura do pavimento.....	62
Figura 3.14 – Instrumentos para medição da temperatura do pavimento	62
Figura 3.15 – Equipamento de ensaio e perímetro de segurança na secção 2.....	63
Figura 3.16 – Ensaio com defletómetro de impacto e medição da temperatura do pavimento	64
Figura 4.1 – Comportamento do módulo de rigidez com a variação da temperatura para a mistura AC14 com porosidade de 6.5%	67
Figura 4.2 – Comportamento do módulo de rigidez com a variação da frequência para a mistura AC14 com porosidade de 6.5%	68
Figura 4.3 – Evolução do módulo de rigidez com a temperatura de 20°C para a mistura AC14 com porosidade de 6.5%	69
Figura 4.4 – Exemplo de obtenção de curva mestra	70
Figura 4.5 – Evolução do <i>shift factor</i> com a temperatura	70
Figura 4.6 – Comparação das curvas mestras da mistura AC14	75
Figura 4.7 – Comparação das curvas mestras da mistura AC16	79
Figura 4.8 – Comparação das curvas mestras da mistura AC20	83
Figura 4.9 – Influência da porosidade na variação do módulo com a temperatura.....	84
Figura 4.10 – Influência do módulo na variação do módulo com a temperatura	84
Figura 4.11 – Coeficientes da Equação 4.6 para as misturas ensaiadas.....	85
Figura 4.12 – Defletogramas para pavimento com 0.10 m de espessura betuminosa e fundação com 20 MPa.....	86
Figura 4.13 – Defletogramas para pavimento com 0.10 m de espessura betuminosa e fundação com 120 MPa.....	86
Figura 4.14 – Defletogramas para pavimento com 0.40 m de espessura betuminosa e fundação com 20 MPa.....	87
Figura 4.15 – Defletogramas para pavimento com 0.40 m de espessura betuminosa e fundação com 120 MPa.....	87
Figura 4.16 – Rácio da deflexão para pavimento com 0.1m de espessura betuminosa e fundação com 20 MPa.....	88
Figura 4.17 – Rácio da deflexão para pavimento com 0.1m de espessura betuminosa e fundação com 120 MPa.....	89
Figura 4.18 – Rácio da deflexão para pavimento com 0.4m de espessura betuminosa e fundação com 20 MPa.....	89

Figura 4.19 – Rácio da deflexão para pavimento com 0.4m de espessura betuminosa e fundação com 120 MPa.....	90
Figura 4.20 – DR em função de h para E=20 MPa e T=20°C para d1 e d2	91
Figura 4.21 – DR em função de h para E=20 MPa e T=20°C para d3 e d4	91
Figura 4.22 – DR em função de E para h=0.10 m e T=20°C para d1 e d2	92
Figura 4.23 – DR em função de E para h=0.10 m e T=20°C para d3 e d4	92
Figura 4.24 – DR em função de T para h=0.10 m e E=20MPa para d1 e d2.....	93
Figura 4.25 – DR em função de T para h=0.10 m e E=20MPa para d3 e d4.....	93
Figura 4.26 – DR em função da distância para h=0.10 m e E=20MPa.....	94
Figura 4.27 – DR em função da distância para h=0.40 m e E=20MPa.....	94
Figura 4.28 – Relação do DR real e dado pelo modelo para E=20 MPa e d1 e d2	96
Figura 4.29 – Relação DR real e dado pelo modelo para E= 40 MPa e d1 e d2	97
Figura 4.30 – Relação do DR real e dado pelo modelo para E=60 MPa e d1 e d2	98
Figura 4.31 – Relação do DR real e dado pelo modelo para E=80 MPa e d1 e d2	99
Figura 4.32 – Relação do DR real e dado pelo modelo para E=100 MPa e d1 e d2	100
Figura 4.33 – Relação do DR real e dado pelo modelo para E=120 MPa e d1 e d2	101
Figura 4.34 – Relação do DR real e calculado pelo modelo proposto para d1 e d2.....	104
Figura 4.35 – Relação do DR real e calculado pelo modelo proposto para d3 e d4.....	104
Figura 4.36 – RMSEA do DR para cada distância de aplicação da carga	106
Figura 4.37 – Defletogramas medidos com defletómetro de impacto na secção 1	109
Figura 4.38 – Defletogramas medidos com defletómetro de impacto na secção 2	110
Figura 4.39 – Defletogramas medidos com defletómetro de impacto na secção 3	110
Figura 4.40 – Defletogramas medido e calculado: secção 1 (retirado do programa JPavBack 2.6.).....	114
Figura 4.41 – Defletogramas medido e calculado: secção 2 (retirado do programa JPavBack 2.6.).....	115
Figura 4.42 – Defletogramas medido e calculado: secção 3 (retirado do programa JPavBack 2.6.).....	117
Figura 4.43 – Defletogramas corrigidos para T=30°C da secção 1	119
Figura 4.44 – Defletogramas corrigidos para T=30°C da secção 2	121
Figura 4.45 – Modelo de um neurónio (adaptado de (Haykin, 1994))	122
Figura 4.46 – Coeficiente de correlação das arquiteturas 1, 2 e 3 na fase de treino em função do número de iterações	126

Figura 4.47 – Coeficiente de correlação arquiteturas 1, 2 e 3 na fase de teste em função do número de iterações.....	126
Figura 4.48 – Rede com arquitetura 4-6-1 (adaptada de (Sivapathasekaran et al., 2010))	127
Figura 4.49 – Relação entre os <i>outputs</i> introduzidos e os dados pela rede (adaptado do programa QNET2000)	128
Figura 4.50 – Relação do DR real e calculado pelo modelo para d1 e d2	131
Figura 4.51 – Relação do DR real e calculado pelo modelo para d2 e d3	131
Figura 4.52 – RMSEA do DR em função da distância de aplicação da carga, para o modelo excluindo E	132
Figura 4.53 – Relação do DR calculado pelo modelo 1 e pelo modelo 2 para d1 e d2	133
Figura 4.54 – Relação do DR calculado pelo modelo 1 e pelo modelo 2 para d3 e d4	133
Figura 4.55 – Diferença, em percentagem, entre o cálculo de DR através do modelo 1 e do modelo 2 para cada módulo de rigidez da fundação do pavimento	134

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Valores típicos do coeficiente de Poisson (AASHTO, 1993)	17
Tabela 2.2 – Tipos e representações de funções de ativação	47
Tabela 3.1 – Percentagem de betume de cada mistura betuminosa.....	52
Tabela 3.2 – Especificações do betume 35/50 (EP, 2009)	52
Tabela 3.3 – Percentagem do Volume de vazios das vigas a ensaiar em cada formulação	57
Tabela 3.4 – Módulos de rigidez da camada betuminosa em função da temperatura	60
Tabela 3.5 – Temperaturas recolhidas durante a campanha de ensaios: secção 1.....	64
Tabela 3.6 – Temperaturas recolhidas durante a campanha de ensaios: secção 2.....	65
Tabela 3.7 – Temperaturas recolhidas durante a campanha de ensaios: secção 3.....	66
Tabela 4.1 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC14 com n= 6.5% ..	72
Tabela 4.2 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC14 com n= 5.6% ..	73
Tabela 4.3 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC14 com n= 8.7% ..	73
Tabela 4.4 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC14 com n=6.5%	74
Tabela 4.5 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC14 com n= 5.6%	74
Tabela 4.6 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC14 com n= 8.7%	74
Tabela 4.7 – Modelo de variação da rigidez da mistura AC14 com a temperatura.....	75
Tabela 4.8 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC16 com n= 5.1% ..	76
Tabela 4.9 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC16 com n= 3.1% ..	76
Tabela 4.10 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC16 com n= 5.3%	77
Tabela 4.11 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC16 com n=5.1%	77
Tabela 4.12 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC16 com n= 3.1%	78
Tabela 4.13 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC16 com n= 5.3%	78
Tabela 4.14 – Modelo de variação da rigidez da mistura AC16 com a temperatura.....	79
Tabela 4.15 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC20 com n= 4.2%	80
Tabela 4.16 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC20 com n= 4.8%	80
Tabela 4.17 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC20 com n= 3.9%	81
Tabela 4.18 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC20 com n=4.2%	81
Tabela 4.19 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC20 com n= 4.8%	82
Tabela 4.20 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC20 com n= 3.9%	82

Tabela 4.21 – Modelo de variação da rigidez da mistura AC20 com a temperatura.....	83
Tabela 4.22 – Coeficientes do modelo de correção para E= 20 MPa.....	96
Tabela 4.23 – Coeficientes do modelo de correção para E= 40 MPa.....	97
Tabela 4.24 – Coeficientes do modelo de correção para E= 60 MPa.....	98
Tabela 4.25 – Coeficientes do modelo de correção para E= 80 MPa.....	99
Tabela 4.26 – Coeficientes do modelo de correção para E= 100 MPa.....	100
Tabela 4.27 – Coeficientes do modelo de correção para E= 120 MPa.....	101
Tabela 4.28 – Coeficientes do modelo de correção da deflexão.....	102
Tabela 4.29 – Tabela ANOVA correspondente ao modelo não linear desenvolvido ...	106
Tabela 4.30 – Deflexões obtidas na secção 1.....	108
Tabela 4.31 – Deflexões obtidas na secção 2.....	108
Tabela 4.32 – Deflexões obtidas na secção 3.....	108
Tabela 4.33 – Módulos de rigidez obtidos por análise inversa: secção 1.....	112
Tabela 4.34 – Deflexão medida e calculada (mm/1000) e erro (%) em cada ensaio na secção 1.....	113
Tabela 4.35 – Módulos de rigidez obtidos por análise inversa: secção 2.....	114
Tabela 4.36 – Deflexão medida e calculada (mm/1000) e erro (%) em cada ensaio na secção 2.....	115
Tabela 4.37 – Módulos de rigidez obtidos por análise inversa: secção 3.....	116
Tabela 4.38 – Deflexão medida e calculada (mm/1000) e erro (%) em cada ensaio na secção 3.....	117
Tabela 4.39 – DR calculado com a Equação 4.11 e deflexão a 30°C (mm/1000) para a secção 1.....	118
Tabela 4.40 – DR calculado com a Equação 4.11 e deflexão a 30°C (mm/1000) para a secção 2.....	120
Tabela 4.41 – Pesos sinápticos (w) de cada conexão e <i>bias</i> (θ) entre as camadas constituintes da rede.....	129
Tabela 4.42 – Contribuição (%) de cada <i>input</i> para a previsão de DR.....	129
Tabela 4.43 – Coeficientes do modelo de correção das deflexões excluindo E.....	130

1 Introdução

A introdução do presente trabalho conta com um enquadramento temático com o objetivo de enquadrar o tema em estudo tanto no tempo como no contexto de Portugal, com a definição dos objetivos do trabalho, explicitados conforme as diferentes tarefas e fases a realizar. Por fim é apresentada resumidamente a organização da dissertação.

1.1 Enquadramento temático

A partir da Segunda Grande Guerra, a rede rodoviária sofreu um grande desenvolvimento tanto no que respeita à sua extensão como ao nível do volume de tráfego e respetivas cargas (Freitas & Pereira, 2001). Em Portugal esta evolução foi mais significativa nos últimos anos, com a construção de muitos quilómetros de estrada, sendo que a grande maioria dos pavimentos usados é do tipo flexível, ou seja formados por material granular e material betuminoso, cujas espessuras variam consoante a intensidade do tráfego no ano horizonte, a capacidade de suporte do solo de fundação e as características dos materiais disponíveis (Branco et al., 2011).

Com o passar dos anos e devido a fatores que contribuíram para a sua degradação como as variações de temperatura, condições climáticas e o tráfego, o pavimento vai perdendo tanto qualidades funcionais como capacidade estrutural. Assim, há atualmente a necessidade de proceder à conservação ou mesmo reabilitação dos pavimentos, com o objetivo de garantir características estruturais (capacidade de suportar as cargas aplicadas) e funcionais (características relacionadas com conforto e segurança dos utentes, como a impermeabilização, atrito, ruído, regularidade e aspeto visual).

Para a determinação da técnica e do tipo de reabilitação mais eficaz em cada caso é necessário começar pelo conhecimento do estado superficial do pavimento e da sua capacidade estrutural. A avaliação da capacidade estrutural do pavimento pode ser feita através do estudo de diversos parâmetros como o módulo de rigidez das camadas, vida

residual, espessura requerida para um novo período de vida e pela deflexão (Branco et al., 2011), sendo que esta avaliação pode ser feita tanto através de ensaios de laboratório como recorrendo a ensaios *in situ*.

A deflexão é um dos parâmetros mais utilizados na avaliação do estado do pavimento, podendo ser obtida através da aplicação de uma carga, possibilitando assim a obtenção do defletograma do pavimento. Através da obtenção de diferentes defletogramas no mesmo ponto é possível apurar variações nos resultados obtidos devido a fatores de origem natural como a temperatura do pavimento, temperatura do ar, incidência solar e existência de vento. Além disto, os resultados são também influenciados por características dos ensaios como o tempo de aplicação e o nível da carga (Fernando et al., 2001).

Os métodos e equipamentos para obtenção das deflexões do pavimento foram evoluindo ao longo dos últimos anos, sendo o equipamento mais utilizado atualmente o defletómetro de impacto (FWD) devido ao seu rendimento, facilidade de utilização e fiabilidade dos resultados. Este equipamento consiste num atrelado dotado de sensores, o qual permite a realização de ensaios não-destrutivos simulando a passagem de veículos a velocidades entre 60 e 80 km/h e determinando a resposta do pavimento (Antunes, 1993). A par das deflexões obtidas pelo defletómetro de impacto, é importante a obtenção da temperatura a que se encontra o pavimento aquando dos ensaios, uma vez que com o aumento da temperatura se verifica um aumento da deflexão.

No que respeita aos módulos de rigidez das camadas do pavimento, outro dos indicadores da sua capacidade estrutural, geralmente são obtidos através do processo de análise inversa, recorrendo a um programa de cálculo automático. O procedimento de análise inversa divide-se em três fases principais. A definição dos intervalos dos módulos de cada camada, definidos consoante o material que a constitui, a modelação da estrutura do pavimento e a análise dos resultados obtidos (SHRP, 1993a).

O processo de cálculo começa pela introdução de características do pavimento como a espessura e coeficiente de Poisson de cada camada, sendo arbitrados os respetivos módulos. Além disso são introduzidos os dados referentes ao ensaio como a carga

aplicada, a distância entre os sensores, o diâmetro da placa e as deflexões medidas no pavimento. Com estes dados, e através de um processo iterativo é possível a obtenção de uma bacia ajustada à bacia de deflexão resultante da aplicação da carga de pico aplicada pelo defletómetro de impacto (Santos, 2009).

Como referido, com o conhecimento de características do pavimento como o seu módulo ou deflexão é possível avaliar o estado da estrutura, mas uma vez que tanto a deflexão como o módulo de rigidez variam com a temperatura, A comparação de dois resultados diferentes só é plausível se a temperatura do pavimento for a mesma. Assim, os resultados obtidos pelo defletómetro de impacto devem ser ajustados ou corrigidos para condições de referência, como é o caso da temperatura (Fernando et al., 2001). A correção dos módulos e das deflexões pode ser feita a partir de diferentes abordagens, como se mostrará ao longo deste trabalho.

1.2 Objetivos do trabalho

Os principais objetivos do presente trabalho são a formulação de um modelo de correção das deflexões do pavimento obtidas com defletómetro de impacto a determinada temperatura para uma temperatura de referência, e a formulação de um modelo de correção dos módulos de rigidez em função das características das misturas betuminosas. Para alcançar os objetivos referidos, são realizadas três fases diferentes, nomeadamente um estudo laboratorial, um estudo *in situ* e uma análise numérica.

- Avaliação em laboratório: nesta fase são realizadas lajes de misturas betuminosas AC14, AC16 e AC20, sendo feita uma laje de cada mistura para cada porosidade distinta. De forma a garantir um intervalo de valores abrangente, optou-se por misturas com porosidades médias de 2, 4 e 6 %. Cada uma das lajes será cortada em vigas para ensaios de módulo de rigidez a temperaturas de -10, 0, 10, 20 e 30°C. Através da análise dos resultados obtidos será determinado um modelo que permite a correção do módulo de cada tipo de mistura para um módulo a determinada temperatura de referência, em função da porosidade.

- Modelação numérica: através do *software* de cálculo JPav2.1, nesta fase será definido um modelo de pavimento com uma camada betuminosa e uma camada granular cuja espessura da camada betuminosa, módulo de rigidez do solo de fundação e temperatura de ensaio variam, sendo calculadas as deflexões obtidas a diferentes distâncias do ponto de aplicação da carga. Neste caso foram considerados para o módulo de fundação valores a variar entre 20 e 120 MPa, a espessura da camada betuminosa entre 0.1 e 0.4 m e a temperatura, tal como no estudo laboratorial, entre -10 e 30°C.

Com os valores obtidos nesta fase será possível a definição de um modelo de cálculo das deflexões a uma temperatura de referência, partindo do seu valor à temperatura de ensaio. Nesta fase serão utilizados alguns dados provenientes das fases explicitadas anteriormente, nomeadamente os módulos de rigidez arbitrados para a camada betuminosa, que variando conforme a temperatura são obtidos através dos ensaios laboratoriais descritos, e a verificação da adequação do modelo, conseguida com os dados provenientes do estudo *in situ*. Além disto, com os dados obtidos com o *software* de cálculo JPav2.1 será ainda proposto um modelo de cálculo através da utilização de redes neuronais artificiais.

- Avaliação *in situ*: a avaliação *in situ* contará com o defletómetro de impacto para medição da deflexão de três secções de pavimento com diferentes constituições a diferentes temperaturas, durante o período de um dia de forma a permitir uma variação significativa da temperatura. Com os dados recolhidos procede-se à análise inversa com o *software* de cálculo JPavBack, obtendo-se assim a bacía de deflexão das secções em estudo. Os dados obtidos permitem relacionar as deflexões a diferentes temperaturas e a calibração dos dados para a fase de modelação numérica.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação é composta por seis capítulos, incluindo o capítulo correspondente à introdução onde este ponto se insere.

No Capítulo 2 apresenta-se o Estado da Arte do tema em estudo. O capítulo aborda várias temáticas como considerações acerca dos pavimentos, focando-se os pavimentos flexíveis, dimensionamento, reabilitação e avaliação da capacidade de carga. De seguida apresentam-se vários modelos aceites nacional e internacionalmente de correção dos módulos de rigidez e de correção das deflexões do pavimento. Por fim o capítulo aborda algumas considerações acerca das redes neuronais artificiais nomeadamente a sua história, os diferentes tipos de rede existentes e o seu modo de funcionamento.

O Capítulo 3, Metodologia de trabalho, tem como objetivo dar a conhecer a metodologia seguida e as considerações tomadas ao longo das diferentes etapas, seja estudo laboratorial (onde são referidos também, resumidamente, os materiais utilizados), *in situ* ou modelação numérica.

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos nas diversas etapas descritas no Capítulo 3, apresentando ainda os modelos desenvolvidos e a sua análise no que respeita aos erros obtidos. Através dos ensaios *in situ* descritos no Capítulo 3, nesta fase é feita a validação dos modelos desenvolvidos. Além disto explicita-se ainda os procedimentos das redes neuronais assim como as melhores opções a considerar neste estudo.

O Capítulo 5 tem como objetivo apresentar as conclusões do trabalho, assim como os trabalhos futuros que seriam levados a cabo no caso de uma melhoria ou continuidade do trabalho.

2 Estado da Arte

Este capítulo faz menção, primeiramente, aos pavimentos rodoviários e à sua reabilitação, dando mais ênfase aos pavimentos do tipo flexível por serem os mais utilizados em Portugal permitindo uma contextualização com o que será apresentado ao longo do trabalho. Depois disto, e em consonância com a reabilitação dos pavimentos apresenta-se o princípio da avaliação da capacidade de carga, incluindo os ensaios a realizar e equipamentos a utilizar. Por fim, abordam-se os modelos de cálculo mais relevantes existentes na bibliografia, tanto no que respeita à correção dos módulos de rigidez como à correção das deflexões do pavimento.

2.1 Dimensionamento e reabilitação de pavimentos

Os pavimentos rodoviários têm como função assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança durante um determinado período de vida sob ação do tráfego e nas condições climáticas que ocorram (Branco et al., 2011).

Consoante a sua constituição, os pavimentos rodoviários podem ser de três tipos, flexíveis, rígidos ou semi-rígidos. Em Portugal são predominantes os pavimentos flexíveis, tendo-se optado, por isso, pelo seu estudo.

Os pavimentos flexíveis possuem uma constituição baseada em material betuminoso e granular. As camadas betuminosas são as menos espessas e contam normalmente com três camadas, uma camada de desgaste, uma de regularização e uma de base. As camadas granulares, colocadas numa posição inferior, são constituídas por material não ligado estabilizado mecanicamente não exibindo resistência à tração (Minhoto, 2005). A constituição do pavimento varia consoante a intensidade do tráfego no ano horizonte, a capacidade de suporte do solo de fundação e as características dos materiais disponíveis (Branco et al., 2011).

Com o passar dos anos, o pavimento sofre ação de agentes que promovem e aceleram a sua degradação, podendo ser incluídos o tráfego e as condições climáticas. As ações do tráfego provocam tensões verticais e tangenciais nas camadas que para efeitos de dimensionamento são geralmente expressas por passagens de um eixo padrão, tendo-se em conta somente a ação dos veículos pesados. No que concerne às condições climáticas, estas incluem as variações de temperatura e a ação de água proveniente das chuvas. Na Figura 2.1 é possível observar a constituição de um pavimento do tipo flexível assim como as solicitações referidas.

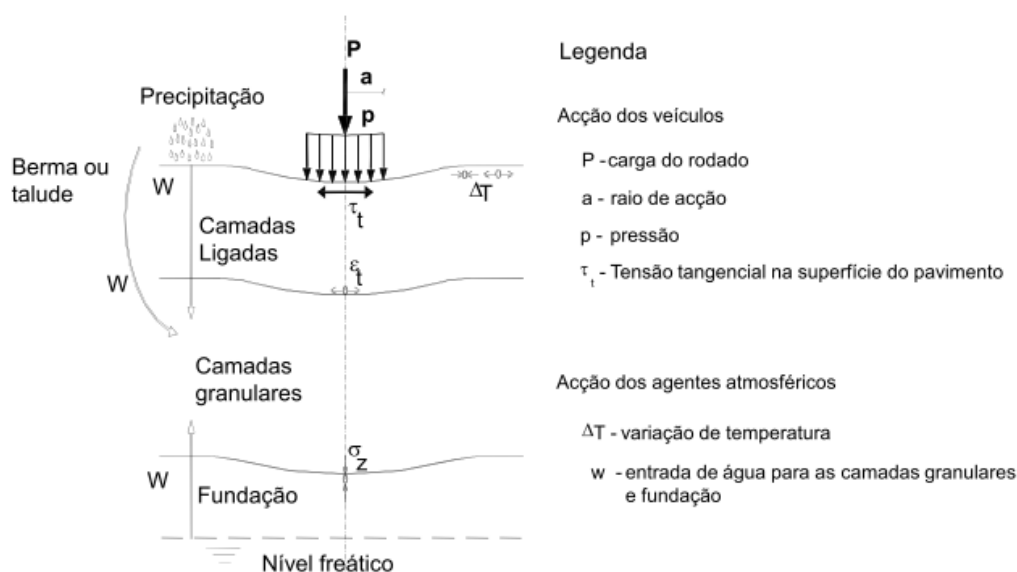


Figura 2.1 – Constituição e solicitações de um pavimento flexível (Branco et al., 2011)

Como se pode verificar, a carga aplicada pelo tráfego provoca tensões verticais no topo da fundação e tensões tangenciais no fundo das camadas betuminosas. O dimensionamento dos pavimentos é feito de forma que estas extensões sejam inferiores às admissíveis.

A estrutura definida para o pavimento deve assegurar a função estrutural e funcional em função de padrões de qualidade. A função estrutural está ligada à capacidade que o conjunto das diversas camadas tem para resistir às cargas aplicadas pelos veículos e às ações climáticas, sem sofrer degradações que ponham em risco a funcionalidade do pavimento (Pais et al., 2000). No que concerne à função funcional, esta relaciona-se com o conforto e segurança dos utentes.

Para análise estrutural de um pavimento flexível considera-se geralmente a Teoria Elástica de Boussinesq, para calcular tensões e deslocamentos. Considera-se, assim, que o material tem um comportamento elástico, linear, homogéneo e isotrópico. De forma a simplificar o cálculo estrutural foram desenvolvidas hipóteses como a de Westgaard, Hogg e Holl, sendo a mais divulgada a teoria de multicamada de Burmister. Esta parte da teoria da elasticidade e simula o pavimento como um sistema de múltipla camada, sendo que a camada superior é um sólido elástico que pode sofrer deformações verticais, definido pela sua espessura e módulo de elasticidade. Assume-se que estas camadas encontram-se apoiadas sobre um espaço semi-infinito de Boussinesq ou seja um meio homogéneo, elástico e isotrópico (García & Castro, 2011) e (Pereira, 1971).

Ao longo da sua vida, o pavimento apresenta uma evolução que em geral se traduz pelo aparecimento de uma vasta diversidade de degradações, as quais contribuem para uma contínua redução da sua qualidade. As degradações mais relevantes compreendem o aparecimento de deformações permanentes e o desenvolvimento de fendilhamento nas camadas betuminosas. A diversidade de degradações inclui deformações (rodeiras localizadas, de grande e pequeno raio e abatimento), fendilhamento (fendas por fadiga, longitudinais e transversais), desagregação da camada de desgaste (ninhos e peladas) entre outras. Tendo em conta os efeitos das degradações no pavimento, o incremento do tráfego nos últimos anos, interesses económicos associados e o decréscimo da capacidade de carga do pavimento é necessário proceder a ações de conservação ou reabilitação, consoante o objetivo seja repor a qualidade do pavimento no momento de abertura do tráfego ou melhorar as suas características especialmente a nível estrutural, para solicitações num novo período de vida (Pereira & Miranda, 1999).

No que respeita às ações de reabilitação, que podem ser feitas através de reciclagem (seja *in situ* ou em central e variando os materiais a utilizar) ou através da colocação de novas camadas de material sobre o pavimento existente é necessário, para definir o tipo e quantidade de material a colocar, o conhecimento das condições em que se encontra o pavimento, ou seja, da sua capacidade de carga. Para esta avaliação, e além da inspeção visual, a auscultação dos pavimentos é utilizada com o objetivo de o caracterizar estruturalmente. Como referido anteriormente, a capacidade de carga pode ser avaliada recorrendo a ensaios *in situ* e laboratoriais.

2.2 Avaliação da capacidade de carga dos pavimentos

A capacidade de carga de um pavimento é definida como uma característica do seu estado estrutural, ligada à sua capacidade para suportar as ações devidas ao tráfego futuro (Antunes, 1993). Assim, para que um pavimento desempenhe corretamente as suas funções deverá possuir capacidade de carga suficiente, devendo ser tido em consideração que esta característica varia com o tempo e com a agressividade do tráfego.

A caracterização do estado estrutural do pavimento para avaliação da capacidade de carga é tradicionalmente efetuada através da inspeção visual, ensaios de carga e outros ensaios complementares. Segundo Antunes (1993), os ensaios de carga podem ser destrutivos ou não destrutivos, sendo que as metodologias adotadas na realização destes estudos também se dividem em dois grupos, os métodos quase exclusivamente empíricos e os métodos analíticos, isto é, assentes na análise estrutural do pavimento. Os métodos empíricos assentam na medição de um único parâmetro, por exemplo a deflexão. Com este indicador e com o conhecimento da constituição do pavimento é estimada a sua capacidade de carga ou espessura necessária para um eventual reforço.

Para a avaliação da capacidade de carga admite-se que as deflexões, ou seja as deformações observáveis à superfície do pavimento, constituem o melhor indicador da qualidade estrutural, particularmente no que concerne às camadas granulares e ao solo de fundação. A partir do conhecimento das deflexões é possível conhecer a capacidade global do conjunto pavimento-fundação, identificando a contribuição de cada camada para as deflexões medidas a várias distâncias do ponto de aplicação da carga (Pereira & Miranda, 1999).

2.2.1 Determinação das deflexões do pavimento

Como referido anteriormente, a determinação da capacidade de carga através das deflexões experimentadas pelo pavimento quando sujeito a uma carga pode ser feita recorrendo a dois tipos de ensaio, destrutivos e não destrutivos. Os ensaios não destrutivos são os mais utilizados no que respeita à análise da capacidade de carga,

tendo como principal vantagem o facto de não danificarem o pavimento, permitindo assim a realização de mais ensaios. Os equipamentos que permitem a análise da capacidade de carga do pavimento através da medição da deflexão em modo estacionário ou movimento de reduzida velocidade designam-se habitualmente por defletómetros ou defletógrafos (Branco et al., 2011).

Apesar de terem sido desenvolvidos novos equipamentos com maior rendimento, os mais representativos deste tipo são a Viga Benkleman, o Defletógrafo Flash, o Curviâmetro e o Defletómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer – FWD). Destes equipamentos, salienta-se o defletómetro de impacto por ser um equipamento largamente utilizado neste tipo de análise e por ser utilizado para este trabalho (Figura 2.2).



Figura 2.2 – Defletómetro de Impacto

O defletómetro de impacto é um atrelado, montado com um sistema de geração de carga e dispositivos para medição das deflexões ao longo do mesmo, sendo a recolha dos resultados e o controlo dos ensaios feitos no interior do veículo rebocador. O ensaio consiste na aplicação de uma força de impulso gerada pela queda de uma massa de determinada altura sobre um conjunto de amortecedores assentes na superfície do pavimento e na medição das deflexões daí resultantes. A carga é transmitida ao pavimento através de uma placa circular de 30 ou 45 centímetros de diâmetro,

simulando a passagem de um veículo a uma velocidade entre 60 e 80 km/h (Antunes, 1993).

Segundo Santos (2009), as vantagens da utilização do defletómetro de impacto são a sua elevada precisão e reduzida dispersão na medição das deflexões, a possibilidade de aplicar diferentes níveis de carga para medição num mesmo ponto, facilidade de operação e medida, registo automático da temperatura do ar, do pavimento e da distância entre pontos de medição.

Apesar de ser um equipamento muito utilizado e com vantagens constatadas, deve ser reconhecido pelos operadores que a medição de deflexões num mesmo local em horas diferentes poderá levar a resultados diferentes. Além disto, deve ser tido o cuidado de registar o local exato dos ensaios, verificar se da medição da temperatura do ar e do pavimento se obtém resultados adequados e medir a temperatura do pavimento em orifícios verticais em zonas representativas (FHWA, 2000).

Na Figura 2.3 representam-se as zonas de tensão, salientando-se que conforme o sensor em que for recolhido o resultado da medição da deflexão, esta diz respeito a uma camada de pavimento diferente.

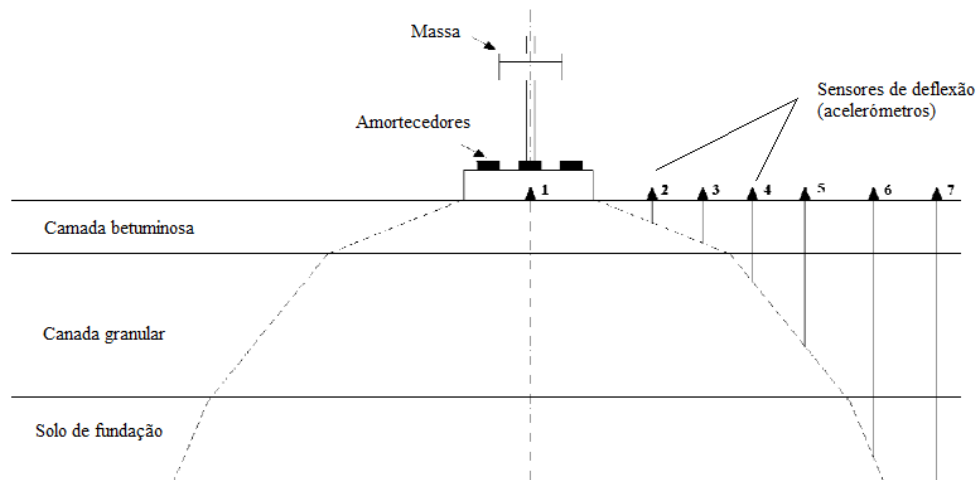


Figura 2.3 – Representação do defletómetro de impacto e zonas de tensão (Freitas 1999)

Na Figura 2.3 é visível uma distribuição de tensão diferente consoante a camada, distribuição que é dependente da rigidez ou módulo do material que lhe pertence. Desta

forma, com o aumento da rigidez a tensão dispersa-se por uma maior área (SHRP, 1993a). Verifica-se, ainda, que cada sensor mede a deflexão referente a determinada camada, como se pode observar que o sensor localizado na zona de aplicação da carga (sensor 1) mede a deformação máxima do conjunto solo-fundação, o sensor 5, por exemplo, mede a deformação relativa a uma camada granular e o sensor número 7 mede a deformação do solo de fundação.

A deflexão máxima medida é afetada por diversos fatores que incluem fatores de carga (carga aplicada, raio da placa circular e pressão de contacto), fatores estruturais (número, espessura, módulo de rigidez e coeficiente de Poisson das camadas), temperatura, descontinuidades no pavimento e variação da estrutura do pavimento (SHRP, 1993b) e (FHWA, 2000).

Segundo FHWA (2000) a rigidez das misturas betuminosas é muito sensível às alterações da temperatura que ocorrem tanto em longos períodos de tempo (alterações sazonais) como em curtos períodos (alterações horárias). Com o aumento da temperatura do pavimento, em particular das camadas betuminosas, a deflexão irá aumentar caso todos os outros fatores se mantenham. Assim, as deflexões medidas no verão serão maiores do que se medidas em períodos mais frios, sem alteração das restantes variáveis. No que respeita às alterações da temperatura com a profundidade (gradientes verticais), a sua influência na tensão das camadas verifica-se mais significativa com o aumento da espessura.

Os resultados dos ensaios de carga associados ao conhecimento da constituição do pavimento permitem o estabelecimento do modelo do seu comportamento estrutural. Segundo Antunes (1993), o solo de fundação e os materiais dividem-se em três grupos, consoante a relação tensão-deformação.

- Solos e materiais granulares não tratados – apresentam um comportamento não linear, ou seja, o módulo de rigidez depende do estado de tensão;
- Misturas betuminosas – comportamento visco-elástico, depende da temperatura e do tempo de atuação das solicitações;

- Misturas com ligantes hidráulicos – comportamento elástico-linear para o nível de tensão a que normalmente são sujeitos.

Dado o interesse dos pavimentos flexíveis salienta-se o comportamento das misturas betuminosas, podendo-se identificar uma rigidez elástica quando se está na presença de baixas temperaturas e curtos tempos de carregamento, e uma rigidez viscosa para temperaturas altas e elevados tempos de carregamento. No que concerne à rigidez elástica, esta é função da rigidez elástica do betume e da composição volumétrica da mistura betuminosa, correspondem-lhe os valores mais elevados da rigidez e é utilizada para caracterização da mistura betuminosa em dimensionamento. Por outro lado, a rigidez viscosa é usada fundamentalmente para previsão das deformações permanentes (Pais & Pereira, 2002).

Desta forma, e dada a influência da temperatura no comportamento das misturas betuminosas, salienta-se a importância da obtenção da temperatura do pavimento aquando da medição das deflexões, seja através da medição com termopares seja através do uso de modelos de previsão da temperatura a diferentes profundidades.

2.2.2 Definição dos módulos de rigidez

Dado o comportamento visco-elástico das misturas betuminosas, segundo Pais & Pereira (2002) e Teixeira (2000), quando aplicado um carregamento sinusoidal caracterizado pela Equação 2.1, a mistura deforma-se com um certo atraso, mas com a mesma frequência.

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega.t) \quad (2.1)$$

Este atraso ou desfasamento caracteriza-se pela Equação 2.2, sendo designado ângulo de fase (ϕ).

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega.t - \phi) \quad (2.2)$$

O ângulo de fase é tanto maior quanto mais a mistura se aproxima de um comportamento viscoso, e varia de forma crescente, entre 0 e 90° com o número de aplicações de carga, uma vez que a mistura começa a comportar-se cada vez mais como um material viscoso e não elástico. Como a relação entre a tensão aplicada e a extensão que esta produz define o módulo da mistura betuminosa, este é dado pela Equação 2.3.

$$E^* = |E^*|. (\cos \phi + i. \sin \phi) \quad (2.3)$$

Assim, o módulo é caracterizado por duas componentes, uma componente real (Equação 2.4) e uma componente imaginária (Equação 2.5).

$$E_1 = |E^*|. \cos \phi \quad (2.4)$$

$$E_2 = |E^*|. \sin \phi \quad (2.5)$$

A componente real corresponde ao comportamento elástico da mistura, dizendo respeito à energia armazenada no material durante o carregamento que se liberta com a descarga. Quanto à componente imaginária corresponde ao comportamento viscoso da mistura, resultando a energia perdida por atrito interno. O módulo complexo pode ser representado pelo seu valor em módulo dado pela Equação 2.6 ou pelo seu ângulo de fase, segundo a Equação 2.7.

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (2.6)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \quad (2.7)$$

Segundo Pais (1999), tanto os resultados do módulo de rigidez como do ângulo de fase podem ser representados graficamente recorrendo a curvas de igual temperatura ou de igual frequência, podendo esta representação ser substituída por uma forma de representação chamada “curva mestra”. Estas curvas obtêm-se pela translação das curvas módulo de rigidez-frequência de diversas temperaturas para uma mesma curva, sendo a translação efetuada pela aplicação de um fator de escala (*shift factor*) em função da temperatura. A utilização da curva mestra tem como vantagem permitir a obtenção do módulo de rigidez de uma mistura betuminosa, para qualquer combinação de

temperatura e frequência dentro do intervalo de valores medidos. Na Figura 2.4 é possível observar o aspeto de uma curva mestra, neste caso seguindo uma função polinomial de grau 4 e cujo eixo das abcissas corresponde ao fator de escala referido, e o eixo das ordenadas ao módulo de rigidez.

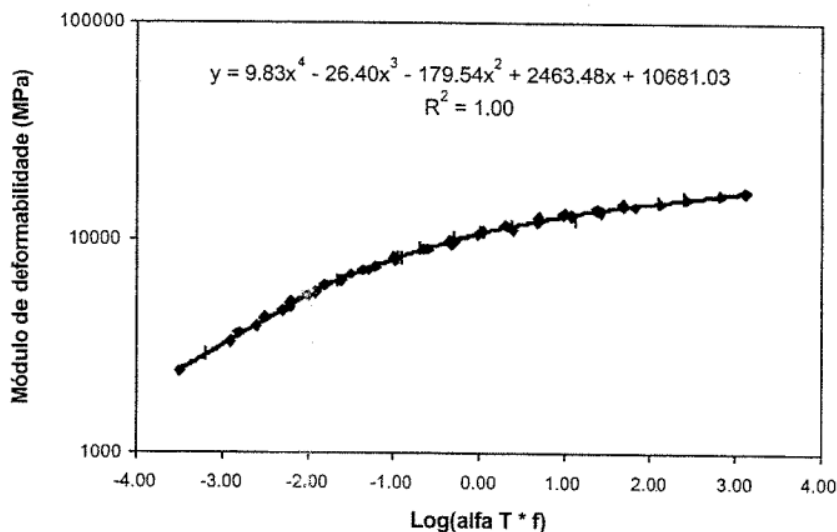


Figura 2.4 – Curva mestra (Pais & Pereira, 2002)

Quando são realizados ensaios para obtenção das deflexões dos pavimentos, a definição do módulo de rigidez é possível a partir do método de análise inversa, através de *softwares* de cálculo. Os programas de cálculo automático mais utilizados nos últimos anos são o BISAR, desenvolvido pela Shell, ELSYM 5 desenvolvido pela Universidade de Berkeley, WESDEF desenvolvido pelo “U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station e MODULUS, desenvolvido pela Universidade do Texas, entre outros (Pereira, 2007) e (Lukanen et al., 2000).

Segundo Goktepe et al. (2005), os modelos de análise inversa podem ser agrupados em três categorias, nomeadamente adaptativa, estática e dinâmica. Os processos adaptativos são do tipo redes neurais (*softwares* aprendem o comportamento do pavimento através do conhecimento de padrões de *inputs* e *outputs*), enquanto que os processos estático e dinâmico classificam-se pelo tipo de carga e pela utilização de modelos de resposta convencionais. Além desta classificação, os modelos de cálculo do módulo de rigidez podem ser divididos em cálculo “para a frente” ou “para trás”. No primeiro caso a

deflexão é calculada para um dado tráfego e estrutura do pavimento e no segundo caso, o cálculo “para trás”, os valores calculados são comparados com as deflexões medidas através de ensaios não destrutivos, e são determinados novos parâmetros geométricos. Os passos de otimização continuam até que a diferença entre as deflexões calculada e medida seja inferior a um determinado critério de erro definido.

Assim, o método de análise inversa tem por base a utilização de um *software* de cálculo onde são introduzidas as características do pavimento como a espessura, o módulo de rigidez de cada camada que é arbitrado, e o coeficiente de Poisson. No que respeita a este último parâmetro, a sua obtenção através da teoria elástica linear levou a valores irreais pelo estudo de diversos autores sendo, portanto, aconselhado arbitra-lo (Pais, 1999). Embora o coeficiente de Poisson não tenha grande influência nos resultados obtidos, é importante admitir valores típicos para os materiais do pavimento. Na Tabela 2.1 apresentam-se alguns desses valores típicos para diferentes materiais, salientando-se que este coeficiente depende da temperatura das misturas betuminosas (a temperaturas mais baixas correspondem valores mais baixos).

Tabela 2.1 – Valores típicos do coeficiente de Poisson (AASHTO, 1993)

Material	Gama de valores
Misturas Betuminosas	0.15 – 0.45
Materiais Granulares	0.30 – 0.40
Solos	0.30 – 0.50

Além das características do pavimento, no programa de cálculo devem ainda ser introduzidos os dados do ensaio como as deflexões medidas e a distância de cada sensor à aplicação da carga, a magnitude da carga aplicada e o raio da placa de carga do defletómetro de impacto. Através de um processo iterativo onde se fazem variar os módulos arbitrados, a bacia das deflexões resultante é comparada com a bacia da secção em estudo até que a diferença entre ambas seja inferior a 5-10% (Santos, 2009).

O método de análise inversa apresenta algumas limitações principalmente no que respeita à própria formulação dos *softwares* de cálculo, por não considerarem a existência de degradações no pavimento como é o caso do fendilhamento. Além disto combinações de módulos diferentes podem dar origem a deformadas idênticas, podendo

assim o pavimento não ser corretamente modelado. Segundo o estudo efetuado por Killingsworth & Von Quintus (1997), os resultados obtidos podem ser diferentes consoante o programa de cálculo utilizado e não há uma solução única para determinada bacia de deflexão, devendo ser tido em consideração o julgamento do operador entre outros parâmetros.

Como anteriormente referido, os resultados obtidos nos ensaios de deflexão são influenciados devido aos efeitos da temperatura, tipo de mistura, nível e frequência da carga aplicada. Assim, depois de obtidas as características do pavimento, e segundo Fernando et al. (2001), os resultados obtidos pelo defletómetro de impacto para aplicação em projeto, avaliação do pavimento e outras aplicações devem ser ajustados ou corrigidos para condições de referência da temperatura.

Ao longo dos últimos anos foram desenvolvidos vários modelos com o intuito de corrigir os módulos de rigidez e a deflexão para uma determinada temperatura de referência. De seguida apresentam-se alguns desses modelos, assim como as considerações adotadas por cada um dos autores.

2.3 Correção dos módulos de rigidez

Os modelos para correção dos módulos de rigidez têm como objetivo transformar o módulo determinado à temperatura de ensaio num módulo a uma temperatura de referência selecionada. São vários os modelos desenvolvidos nos últimos anos, podendo ser enumerados os métodos desenvolvidos pelo LNEC (2005), Antunes (1993), AASHTO (1993), Kim et al. (1993 b) e Park et al. (2000), entre outros. Como se poderá ver de seguida, os métodos foram desenvolvidos segundo formulações diferentes, recorrendo a ábacos, modelos lineares ou logaritmo. Salienta-se que a ordem de apresentação dos modelos não segue nenhum critério de importância específico.

Primeiramente apresenta-se o modelo desenvolvido pelo LNEC em 2005 (Santos, 2009) que estabelece uma relação entre o módulo de rigidez à temperatura do ensaio e o módulo à temperatura de referência, neste caso 20°C, como se pode verificar na Equação 2.8.

$$E_T = (-0.0282.T + 1.5562).E_{20^{\circ}C} \quad (2.8)$$

em que:

E_T – módulo de rigidez à temperatura do ensaio (MPa);

$E_{20^{\circ}C}$ – módulo de rigidez à temperatura de referência 20°C (MPa);

T – temperatura do ensaio (°C).

Antunes (1993) desenvolveu um modelo semelhante ao anterior, em que a conversão do módulo se faz com um modelo linear, como se pode verificar na Equação 2.9.

$$E_T = (1.635 - 0.0317.T).E_{20^{\circ}C} \quad (2.9)$$

Salienta-se que as constantes apresentadas na equação possuem o mesmo significado que as apresentadas na Equação 2.8.

A American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO 1993) desenvolveu um método de correção do módulo de rigidez e outro de correção da deflexão, como se verá adiante. O método de correção do módulo de rigidez desenvolvido é iniciado pelo cálculo da média da temperatura da superfície do pavimento ao longo do ensaio. A metodologia permite a determinação de um fator corretivo que, multiplicado pelo módulo à temperatura de ensaio, iguala o módulo à temperatura de referência selecionada, neste caso 70°F ou seja aproximadamente 21°C. Assim, a relação para a determinação do módulo de rigidez é apresentada na Equação 2.10.

$$E_{70^{\circ}F} = Fe \times E_{tp} \quad (2.10)$$

em que:

$E_{70^{\circ}C}$ – módulo corrigido (MPa);

Fe – fator corretivo do módulo;

E_{tp} – módulo antes da correção, à temperatura de ensaio (MPa).

A determinação do fator corretivo é feita com o ábaco da Figura 2.5 em que o único dado de entrada é a temperatura de ensaio, no eixo das abcissas.

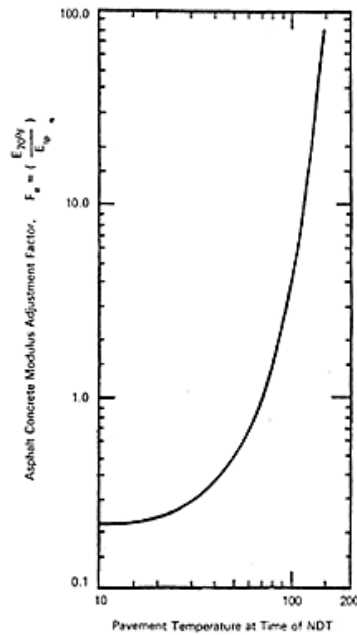


Figura 2.5 – Ábaco para determinação do fator corretivo (AASHTO, 1993)

O método desenvolvido pela (AASHTO 1993) tem como vantagem a facilidade de utilização do ábaco, não sendo assim necessárias expressões de cálculo de difícil e demorada utilização.

Para o modelo de correção desenvolvido por Kim et al. (1993) foram efetuados ensaios com uma hora de intervalo durante um dia inteiro, uma campanha de ensaios em cada estação do ano de forma a avaliar diferentes variações de temperatura. A temperatura do pavimento foi obtida por medição com termopares, de forma a não ser influenciada pelas condições ambientais. A obtenção do módulo de elasticidade foi feita com o *software* de cálculo de análise inversa MODULUS. A expressão foi calibrada para uma temperatura de referência de 68°F (20°C), e tem uma forma não linear, como se pode observar na Equação 2.11.

$$E_{68} = 10^{0.0153(T-68)} E_T, \quad (2.11)$$

em que:

E_{68} – módulo corrigido à temperatura de referência, em Fahrenheit;

E_T – módulo obtido por análise inversa à temperatura de referência (MPa);

T – temperatura a meio da camada betuminosa aquando do ensaio (°F).

O trabalho desenvolvido por Park et al. (2000), por outro lado, assume uma relação logarítmica entre o módulo de rigidez das camadas e a temperatura do pavimento. Este estudo partiu de medições da temperatura no pavimento com um termómetro digital ao longo de um dia, tendo sido usado o defletómetro de impacto como equipamento de ensaio, com uma carga de 40 kN. Foi utilizado um *software* chamado MICHBACK para o cálculo do módulo através de análise inversa. A relação entre a temperatura a meio da camada betuminosa e o módulo obtido por análise inversa é dada por uma relação do tipo apresentado na Equação 2.12.

$$\log E_T = b + a \times T \quad (2.12)$$

em que:

E_T – módulo calculado pela análise inversa (MPa);

b, a – constantes de regressão;

T – temperatura a meio da camada betuminosa (°C).

Sendo que a obtenção do módulo à temperatura de referência é dada pelo produto do módulo à temperatura de ensaio pelo fator corretivo, e tendo em consideração a Equação 2.12, o fator corretivo é dado pela Equação 2.13.

$$FC = 10^{a(T_r - T)} \quad (2.13)$$

No que respeita ao trabalho desenvolvido por Lukanen et al. (2000), o procedimento de análise inversa adotado por foi feito em três *softwares* de cálculo diferentes (WESDEF, MODULUS 5.1 e ELMOD4), tendo analisado os dados obtidos pelos três programas, uma vez que eles têm especificidades diferentes. A análise do módulo do pavimento através dos programas de cálculo levou à confirmação que este parâmetro varia com a temperatura, como pode ser observado na Figura 2.6, que representa esta relação para todas as estações testadas. Como se pode verificar, o módulo encontra-se dentro de um determinado intervalo o que poderá ser devido à variação da espessura, das propriedades da mistura e do estado em que se encontra a camada betuminosa. Observa-se, também, que o modelo se desenvolve de forma mais apropriada com o módulo numa escala logarítmica.

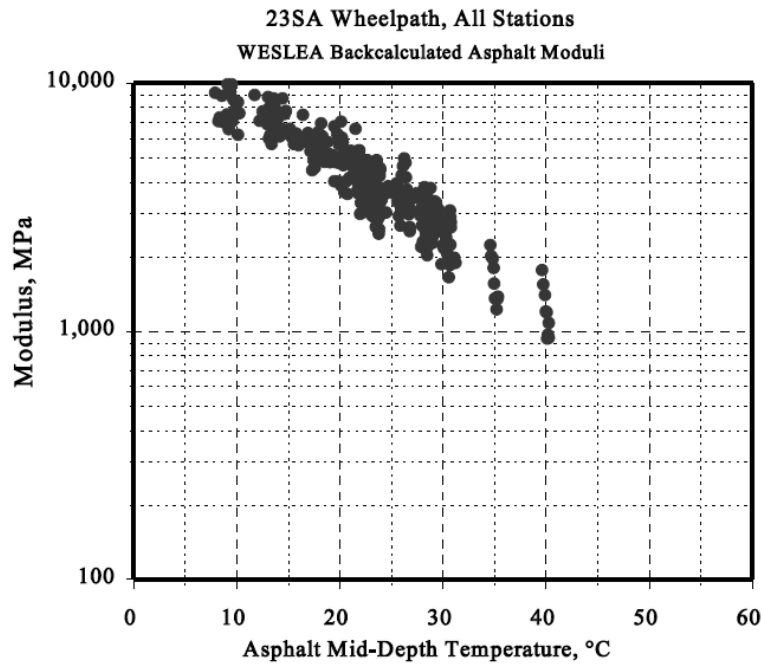


Figura 2.6 – Relação do módulo com a temperatura a meio da camada

No estudo foi determinado um modelo de regressão cujo comportamento (declive) é influenciado pelas características da mistura e do ligante (dependem, entre outros fatores, da latitude (superfície do pavimento usada em climas mais quentes é mais dura do que aquela que se usa em climas mais frios). Além disto, o modelo sofre também influência da estrutura do pavimento (espessura e densidade das camadas) e da condição em que se encontra a superfície do pavimento, variando entre um pavimento novo e pavimento fraturado.

A análise inversa foi feita tendo em consideração o módulo de rigidez da mistura à temperatura de referência, a temperatura e fendilhamento do pavimento, a latitude, a espessura das camadas e o local onde estava a ser realizado o ensaio, ou seja a distância ao ponto de aplicação da carga. Depois de determinada a relação entre o módulo e a temperatura, o fator de ajuste entre estes dois parâmetros pode ser dado pela Equação 2.14. Note-se que o declive da equação está relacionado com a latitude, sendo que geralmente no sul apresentam um comportamento mais íngreme.

$$ATAF = 10^{\text{declive} \times (T_r - T_m)} \quad (2.14)$$

em que:

ATAF – fator de ajuste da temperatura do material betuminoso;

declive – declive da relação entre o logaritmo do módulo e a temperatura;

T_r – temperatura de referência a meio da camada betuminosa (°C);

T_m – temperatura a meio da camada betuminosa, aquando da medição (°C).

Peattie & Ullidtz (1982) desenvolveram uma relação bastante utilizada baseada em medições com defletómetro de impacto ou um equipamento semelhante, em que a relação entre o módulo de rigidez à temperatura de ensaio e à temperatura de 15°C é igualado a uma expressão com base logarítmica, como se pode observar na Equação 2.15 (Santos, 2009).

$$\frac{E_T}{E_{15^\circ\text{C}}} = 1 - 1.384 \cdot \log_{10}\left(\frac{T}{15}\right) \quad (2.15)$$

Note-se que os coeficientes E_T , $E_{15^\circ\text{C}}$ e T possuem o mesmo significado que os coeficientes da Equação 2.8, com a única diferença na temperatura de referência que neste caso é igual a 15°C.

O trabalho desenvolvido pela The Highways Agency (2008), defende também que é necessário ajustar a rigidez dos materiais a 20°C para possibilitar a sua comparação. A relação encontrada por este trabalho representa-se pela Equação 2.16.

$$E_{20} = E_T \cdot 10^{(0.0003 \times (20-T)^2 - 0.022 \times (20-T))} \quad (2.16)$$

em que:

E_{20} – módulo de rigidez a 20°C (MPa);

E_T – módulo de rigidez à temperatura T (MPa);

T – temperatura do pavimento aquando do ensaio, a 100mm de profundidade (°C).

O estudo defende que para a aplicação do fator corretivo a temperatura do pavimento aquando do ensaio deve estar entre 15 e 25°C, caso contrário o fator deverá ser aplicado com precaução. Além disto, e uma vez que para materiais que não estejam intactos a

dependência da temperatura e da rigidez é reduzida, quando o pavimento se encontra seriamente fraturado não deve ser aplicado este fator.

Para o desenvolvimento do modelo de Chen et al. (2000) foi usado o defletómetro de impacto como equipamento de ensaio, tendo sido levados a cabo ensaios em diferentes alturas do ano, ao longo dos quais não foi permitida a passagem do tráfego de forma a garantir que variações na deflexão seriam devidas somente a razões ambientais. Com os dados obtidos foi utilizado o programa MODULUS para efetuar a análise inversa, sendo referido pelos autores que poderá ser impróprio corrigir a deflexão do pavimento e proceder à análise inversa depois. Como se pode verificar pela Equação 2.17, a vantagem deste método é permitir a definição por parte do utilizador da temperatura de referência mais adequada, não permitindo introduzir características das misturas betuminosas, tendo sido, por isso, desenvolvida para misturas utilizadas no local.

$$E_{Tr} = \frac{E_T}{(1.8 T_r + 32)^{2.4462} \times (1.8 T + 32)^{-2.4462}} \quad (2.17)$$

em que:

E_{Tr} – módulo de rigidez à temperatura de referência selecionada (MPa);

E_T – módulo de rigidez à temperatura de ensaio, T (MPa);

T_r – temperatura de referência do pavimento (°C);

T – temperatura de ensaio (°C).

Mais completo mas simultaneamente de mais demorada aplicação, o modelo desenvolvido por Lytton et al. (1990) (Equação 2.18) partiu do conhecimento do módulo de rigidez pelo Asphalt Institute e permite a correção da temperatura mas também da frequência de aplicação da carga.

$$\begin{aligned} \log_{10} E_r = & \log_{10} E + 0.028829 p_{200} \left[\frac{1}{f_r^{0.17033}} - \frac{1}{f^{0.17033}} \right] + 0.000005 \sqrt{p_{ac}} \left[t_r^{(1.3+0.49825 \log_{10} f r)} - \right. \\ & \left. t^{(1.3+0.49825 \log_{10} f)} \right] - 0.00189 \sqrt{p_{ac}} \left[\frac{t_r^{(1.3+0.49825 \log_{10} f r)}}{f_r^{1.1}} - \frac{t^{(1.3+0.49825 \log_{10} f)}}{f^{1.1}} \right] + \\ & 0.931757 \left[\frac{1}{f_r^{0.02774}} - \frac{1}{f^{0.02774}} \right] \end{aligned} \quad (2.18)$$

em que:

E_r – módulo de rigidez em condições de referência de temperatura e frequência de carga (MPa);

E – módulo de rigidez medido ou obtido por análise inversa (MPa);

p_{200} – percentagem de agregado passado no peneiro 200 do peso total;

p_{ac} – percentagem de agregado do peso total;

f_r – frequência de carga de referência de carga (Hz);

f – frequência do ensaio correspondente ao módulo medido ou obtido por análise inversa (Hz);

t_r – temperatura de referência (°F);

t – temperatura de ensaio correspondente ao módulo de rigidez medido ou obtido por análise inversa (°F).

O modelo desenvolvido por Fernando et al. (2001), foi baseado no estudo de Witczak & Fonseca (1996) e permite considerar, além da frequência como no método explanado anteriormente, a viscosidade da camada de desgaste do pavimento, como pode ser observado na Equação 2.19.

$$\log_{10} E_r = \log_{10} E_T + \alpha \left[\frac{1}{1+e^{-(B_R+0.7425 \log_{10} \eta_R)}} - \frac{1}{1+e^{-(B_T+0.7425 \log_{10} \eta_T)}} \right] \quad (2.19)$$

em que:

$\alpha = 1.87+0.003p_4+0.00004p_{3/8} - 0.00018 (p_{3/8})^2 + 0.016p_{3/4}$;

$B_R = 0.716 \log_{10} f_R$;

$B_T = 0.716 \log_{10} f_T$;

E_R – módulo de rigidez corrigido para uma temperatura e frequência de carga selecionadas (MPa);

E_T – módulo de rigidez medido ou obtido por análise inversa (MPa);

η_R – viscosidade da camada de desgaste à temperatura de referência;

η_T – viscosidade da camada de desgaste à temperatura de ensaio;

p_4 – percentagem retida do total de agregados no peneiro n.º 4;

$p_{3/8}$ – percentagem retida do total de agregados no peneiro 3/8;

$p_{3/4}$ – percentagem retida do total de agregados no peneiro 3/4;

f_R – frequência de referência (Hz);

f_r – frequência de ensaio (Hz).

De mais fácil aplicação, o modelo desenvolvido pelo The Danish Road Institute (Baltzer & Jansen, 1994) permite a correção do módulo de rigidez a uma temperatura de referência de 25°C, usando a temperatura do pavimento medida a uma profundidade de 40 mm, independentemente da estrutura do pavimento. A expressão para a correção é dada pela Equação 2.20.

$$E_{ref} = \frac{E_{ac}}{1 - 2 \times \log\left(\frac{T_{ac}}{T_{ref}}\right)}, \quad (2.20)$$

em que:

E_{ref} – módulo de rigidez corrigido para temperatura de referência (MPa);

E_{ac} – módulo de rigidez da camada betuminosa (MPa);

T_{ref} – temperatura de referência, 25°C;

T_{ac} – temperatura a 40 mm de profundidade da camada betuminosa (°C).

Baseando-se no comportamento da bacia de deflexão aquando da aplicação de uma carga e tendo em conta que a medição da deflexão através de métodos não destrutivos só é válida para o momento e condições em que foi feita, Jung (1989) desenvolveu a Equação 2.21, para transformar o módulo para uma temperatura de 21°C.

$$E_{1s} = E_{1a} \times \exp(k(T_a - T_s)) \quad (2.21)$$

em que:

E_{1s} – módulo de rigidez à temperatura de referência (MPa);

E_{1a} – módulo de rigidez à temperatura média de ensaio (MPa);

T_a – temperatura média da camada betuminosa (°C);

T_s – temperatura de referência, igual a 21°C;

k – coeficiente função da temperatura média, $(T_a + T_s)/2$.

O autor considera que quando existem dados suficientes o coeficiente k presente na expressão é mais preciso se determinado a partir da média das temperaturas (medida e de referência), ao contrário do defendido por outros autores que consideram este

coeficiente como constante para um dado intervalo de valores. No que respeita à aplicação do método, os ensaios com defletómetro de impacto e o ajuste da temperatura não devem ser feitos em dias com temperaturas elevadas (acima dos 35°C) ou com ação direta do sol.

Além dos modelos mencionados é possível enumerar modelos corretivos como de Johnson & Baus (1992), em que a temperatura deve ser introduzida em graus Fahrenheit, como dado na Equação 2.22.

$$\lambda_E = 10^{-0.0002175(70^{1.886} - T^{1.886})}, \quad (2.22)$$

em que:

λ_E – fator corretivo;

T – temperatura de ensaio (°F).

Por fim, o modelo de Ullidtz (1987) apresentado na Equação 2.23 permite utilizar a temperatura do pavimento em graus Celcius. No entanto esta deverá ser superior a 1°C. Note-se que os parâmetros da Equação 2.23 possuem o mesmo significado que da Equação 2.22.

$$\lambda_E = \frac{1}{3.177 - 1.673 (\log T)} \quad (2.23)$$

2.4 Correção das deflexões do pavimento

No que respeita aos modelos para correção das deflexões medidas no pavimento, podem ser enumerados vários modelos e, tal como nos modelos de correção do módulo de rigidez, recorrendo a vários tipos de métodos. Nos métodos da AASHTO (1993), Asphalt Institute (1983), SHRP (1993b), por exemplo, o fator corretivo é obtido com base num ábaco, sendo que se identificaram também expressões com base numa formulação logarítmica como no modelo desenvolvido por Kim et al. (2002), linear como no trabalho de Fang et al. (2003) ou não linear como Kim et al. (1993). De seguida apresentam-se, entre outros, os modelos enunciados.

O método de correção da deflexão desenvolvido pela AASHTO (1993) segue um modelo dado pela Equação 2.24. Note-se que o modelo se encontra calibrado para temperatura em graus Fahrenheit, sendo a temperatura de referência 70°F ou seja 21°C.

$$d_{70^{\circ}F} = F_d \times d_{tp} \quad (2.24)$$

em que:

$d_{70^{\circ}F}$ – deflexão corrigida;

d_{tp} – deflexão máxima medida (ponto de aplicação da carga);

F_d – fator de ajuste deflexão-temperatura.

Depois de conhecidos dados como o tipo/espessura de camada betuminosa e a sua temperatura média, a determinação do fator corretivo a utilizar em cada caso é feita com base no ábaco da Figura 2.7.

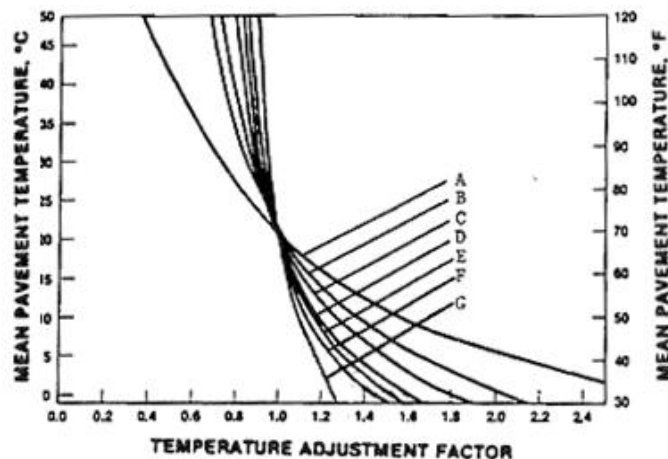


Figura 2.7 – Fator de ajuste da temperatura (AASHTO, 1993)

Como se pode verificar, através da temperatura média do pavimento no eixo das ordenadas e o tipo de pavimento correspondente a cada curva A, B, C, D, E, F ou G (seja, por exemplo, pavimento betuminoso, com cimento ou com material granular) é possível obter o fator de correção da temperatura, no eixo das abcissas. Relativamente a este estudo, Baltzer & Jansen (1994) concluíram que este fator é sensível a gradientes de temperatura elevados, dando no entanto resultados satisfatórios para pavimentos com gradientes de temperatura baixos.

Tal como no método desenvolvido pela AASHTO (1993), o modelo desenvolvido por SHRP (1993b) também permite usar um ábaco para a determinação do fator de correção da temperatura. Este trabalho partiu do desenvolvimento de um *software* chamado FWDCHECK e do uso de expressões de cálculo simplificadas conhecidas. A relação base do programa é a mesma que a apresentada na Equação 2.24 ou seja, o fator de correção da deflexão consoante a temperatura é igual à razão entre a deflexão máxima à temperatura de referência e a deflexão máxima à temperatura de ensaio

No que respeita ao *software* de cálculo desenvolvido, tem como base uma temperatura de referência de 20°C, assume que todas as camadas do pavimento são homogéneas, lineares e elásticas. Assume, ainda, que o coeficiente de Poisson é igual a 0.5 e o módulo de elasticidade é definido consoante o tipo de material. Relativamente ao solo de fundação e à camada betuminosa, o módulo de rigidez da fundação do pavimento é determinado através de expressões que variam consoante a localização do sensor (distância radial), enquanto que o módulo da camada betuminosa é calculado recorrendo à equação do Asphalt Institute simplificada. Assumindo a fixação de alguns parâmetros como a frequência, a referida equação toma a forma da Equação 2.25.

$$\log_{10} E = 6.464 - 0.000145 t_p^{1.94824} , \quad (2.25)$$

em que:

E – módulo de rigidez da camada betuminosa (MPa);

t_p – temperatura do pavimento (°F).

No que diz respeito ao fator de correção da temperatura, neste estudo foi feita uma análise que permitiu concluir que os agentes com mais influência no seu valor são a espessura da camada betuminosa e o módulo da fundação, ao contrário do módulo de elasticidade da camada betuminosa e do seu coeficiente de Poisson.

A determinação do fator corretivo é feita através das curvas representadas na Figura 2.8. Como se pode observar, o fator corretivo no eixo das ordenadas é determinado em função da temperatura no eixo das abcissas (em graus Fahrenheit) e da espessura da camada betuminosa, representada pelas diferentes curvas. Na Figura 2.8 apresentam-se

os ábacos para análise de pavimentos flexíveis com fundação média (69 MPa) e para pavimentos flexíveis com fundação muito boa (138 MPa).

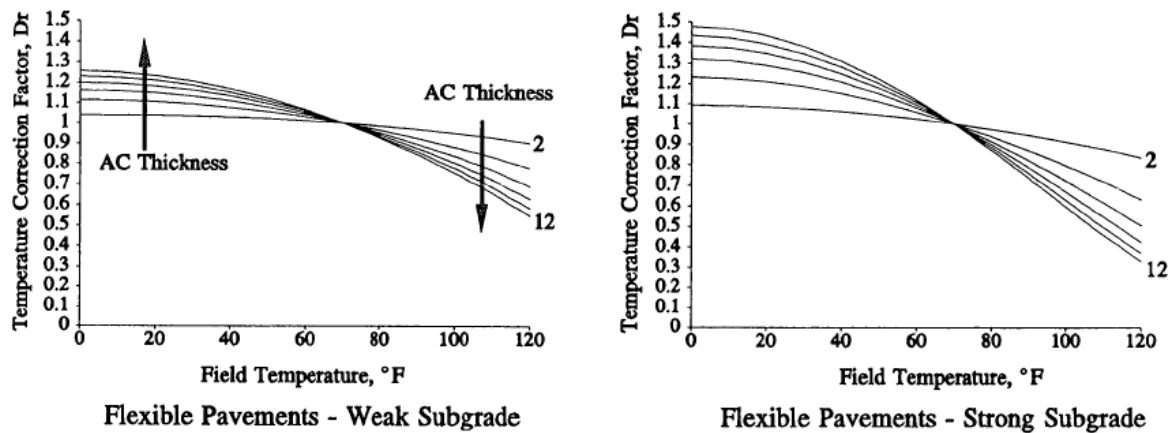


Figura 2.8 – Ábacos para determinação do fator corretivo (SHRP, 1993)

O modelo de correção das deflexões desenvolvido pelo Asphalt Institute (1983) tem como base, assim como em AASHTO (1993), um ábaco. No que respeita à temperatura do pavimento, este método assume a sua previsão, também através de um ábaco, cujos dados de entrada são a temperatura da superfície do pavimento e a profundidade do pavimento onde é efetuada a medição.

Para a determinação do fator corretivo para conversão das deflexões medidas para uma temperatura de referência é usado o ábaco apresentado na Figura 2.9.

Como se pode verificar, o fator de ajuste pode ser obtido através da introdução no ábaco da temperatura a meio da camada betuminosa, no eixo das ordenadas (em graus Celsius ou em graus Fahrenheit). Através de uma linha horizontal prolongada a partir deste valor e da sua interseção com a curva correspondente à espessura, é obtido o fator de ajuste, no eixo das abcissas.

Este método é recomendado para pavimentos com uma base de granular, recomendando ainda que sejam feitos registos de deflexão durante períodos de tempo significativos, e durante os quais ocorram consideráveis variações da temperatura do pavimento.

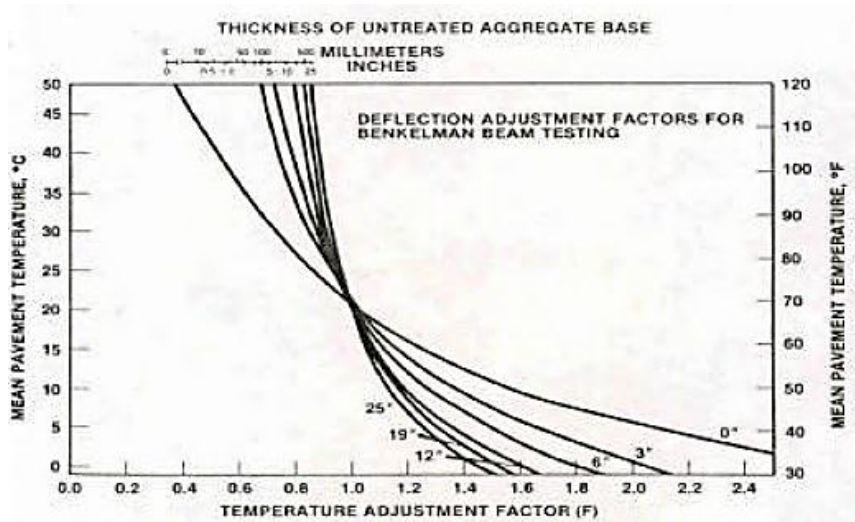


Figura 2.9 – Ábaco para determinação do fator de ajuste (Asphalt Institute, 1983)

Foram desenvolvidos modelos distintos tendo por base diferentes conceitos, como o trabalho desenvolvido por Van Gurp (1995) que parte de diferentes processos de obtenção da temperatura do pavimento (medição da temperatura em três profundidades diferentes e obtenção de uma temperatura equivalente e uniforme e previsão da mesma através da equação de Bells, partindo de dados como a temperatura do ar e a hora do ensaio). No que concerne à temperatura de referência optou por 20°C para a determinação do fator corretivo. O estudo foi feito relacionando graficamente o Índice de Curvatura da Superfície (SCI, dado pela diferença entre a deflexão no ponto de aplicação da carga e a deflexão a 300 mm deste ponto) e o fator corretivo da temperatura, fazendo variar a espessura e rigidez da camada betuminosa. A Figura 2.10 mostra a relação obtida deste estudo para o SCI300.

O mesmo estudo foi feito mas com valores de espessura, rigidez das camadas de base e fundação diferentes, tendo obtido ábacos idênticos. Este facto determina que o fator de normalização da temperatura depende principalmente da espessura da camada betuminosa, da temperatura e da distância ao centro de aplicação da carga.

O trabalho apresenta ainda uma relação entre o fator de normalização da temperatura e a temperatura de ensaio dada pela Equação 2.26. A obtenção da deflexão à temperatura de referência é feita dividindo a deflexão à temperatura de ensaio pelo fator de normalização.

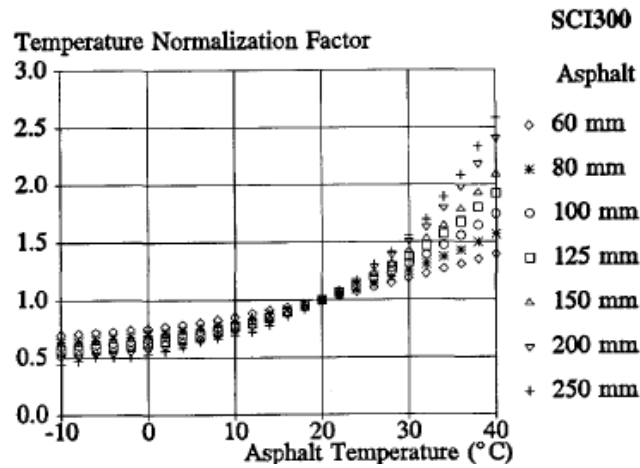


Figura 2.10 – Fator de normalização da temperatura (Van Gurp, 1995)

$$TNF = 1 + \left(a_1 + \frac{a_2}{h_1}\right) (T_A - 20) + \left(a_3 + \frac{a_4}{h_1}\right) (T_A - 20)^2 \quad (2.26)$$

em que:

- TNF – fator de normalização da temperatura;
- T_A – temperatura da camada betuminosa (°C);
- h_1 – espessura da camada betuminosa (mm).

No que diz respeito aos coeficientes a_1 a a_4 presentes na Equação 2.26, estão tabelados para a deflexão no ponto de aplicação da carga, para diferentes Índices de Curvatura da Superfície (SCI – Surface Curvature Indices), como se pode observar na Figura 2.11.

Variable	a_1 (°C ⁻¹)	a_2 (mm/°C)	a_3 (0.001 °C ⁻¹)	a_4 (mm/°C)
d0	0.01661	-0.67095	0.28612	-0.01408
SCI225	0.05955	-2.73223	1.48011	-0.08171
SCI300	0.05398	-2.61130	1.28439	-0.07493
SCI450	0.04720	-2.39175	1.05022	-0.06371
SCI600	0.04190	-2.15168	0.87228	-0.05301

Figura 2.11 – Coeficientes de normalização (Van Gurp 1995)

O desenvolvimento de fatores corretivos foi conseguido também através da análise estatística de dados, recorrendo a diferentes modelos entre os quais lineares e com base logarítmica. O trabalho de Kim et al. (1993) defende o uso de uma regressão não linear

para ajustar as deflexões, Chen et al. (2000), Fang et al. (2003) e Hugo et al. (2001) usam uma regressão linear. No entanto, Kim et al. (2002) veio demonstrar a forma de relacionar graficamente a temperatura e o módulo de elasticidade tendo este último uma base logarítmica. Por outro lado, o trabalho de Lukanen et al. (2000), faz um estudo exaustivo da bacia de deflexão, de forma a chegar ao fator de ajuste da temperatura.

No que respeita ao estudo levado a cabo por Kim et al. (1993), como referido anteriormente para o desenvolvimento da Equação 2.11, a medição da temperatura foi feita através de termopares colocados no pavimento. Os autores referem-se ao fator corretivo da temperatura como o rácio entre a deflexão medida a uma temperatura específica e a deflexão a 20°C. Ao contrário de outros estudos que usavam uma função linear, neste caso é defendido que a relação entre o fator corretivo e a temperatura é melhor expressa como uma relação não linear. Tendo em conta que o fator deverá ser igual a 1 quando a temperatura é igual à de referência (68°F ou 20°C), desenvolveram a relação apresentada na Equação 2.27.

$$D_{68} = 10^{\alpha(68-T)} D_T \quad (2.27)$$

em que:

D_{68} – deflexão ajustada à temperatura de referência;

D_T – deflexão à temperatura de ensaio;

α – $3.67 \times 10^4 \cdot t^{1.4635}$ para o corredor de circulação e $3.67 \times 10^4 \cdot t^{1.4241}$ para o centro da via;

t – espessura da camada (inches);

T – temperatura a meio da camada betuminosa aquando do ensaio (°F).

Para o desenvolvimento do trabalho de Chen et al. (2000) foram realizados ensaios com defletómetro de impacto em três locais com intervalos de dois ou três dias consecutivos, durante doze horas por dia, e em diferentes alturas do ano (Fevereiro, Maio e Agosto), de forma a aumentar o intervalo de temperaturas obtidas. Durante os ensaios não foi permitida a passagem do tráfego de forma a garantir que alterações na deflexão do pavimento dever-se-iam exclusivamente à variação da temperatura. As secções estudadas incluem um pavimento novo, pavimento em serviço e pavimentos

fendilhados, permitindo assim estudar a diferença de resultados obtida. No que respeita à temperatura do pavimento este foi perfurado a 12.7 mm abaixo da superfície, 12.7 mm acima do fundo e a meio da camada betuminosa, tendo-se usado esta última como temperatura efetiva para o modelo. A análise das deflexões obtidas permitiu verificar que apenas as deflexões obtidas nos dois sensores mais próximos da aplicação da carga são influenciadas pela variação de temperatura. Neste caso a correção das deflexões é conseguida através de um modelo linear, tendo desenvolvido um modelo para cada pavimento ensaiado. Na Equação 2.28 apresenta-se o modelo desenvolvido para a secção analisada de um pavimento novo, para a primeira medição.

$$W_{25}^1 = W_{T_c}^1 \times (-0.0319 \times T_c + 1.8354) \quad (2.28)$$

em que:

W_{25}^1 – deflexão corrigida a 25°C (mm);

T_c – temperatura a meio da camada betuminosa, aquando da medição da deflexão (°C);

$W_{T_c}^1$ – deflexão medida à temperatura T_c (mm).

Este trabalho concluiu que as equações desenvolvidas para pavimentos intactos não podem ser usadas em pavimentos fraturados, sendo que nestes últimos a temperatura tem menor influência na deflexão.

Uma relação do mesmo género foi perseguida no trabalho desenvolvido por Fang et al. (2003), como explicitado anteriormente. Neste estudo, a deflexão foi usada como medida do desempenho do pavimento em secções fendilhadas e seladas, tendo sido levados a cabo ensaios com defletómetro de impacto em cinco locais com diferentes condições de temperatura. Tendo em conta que os ensaios foram realizados com intervalo de uma hora, a sua realização desde o início da manhã até ao fim da tarde proporcionou uma variação de temperatura na ordem dos 20°C. Neste estudo importa salientar que a temperatura do pavimento foi alcançada através de previsão, tendo o estudo partido de dois pressupostos diferentes, desenvolvendo assim dois modelos. No primeiro modelo a temperatura do pavimento depende somente da temperatura do ar e da profundidade a que a mesma é requerida, e no segundo modelo utiliza a temperatura da superfície do pavimento, a profundidade e a hora do dia em que são feitos os ensaios.

Assim, para cada um dos modelos de previsão de temperatura foi desenvolvido um procedimento de correção da deflexão, sendo o fator corretivo dado pela relação entre a deflexão à temperatura de referência e a deflexão à temperatura de ensaio. Nesta exposição apresentam-se somente os resultados do primeiro pressuposto referido.

O estudo iniciou-se pelo desenvolvimento de um modelo de regressão linear a partir da relação entre a temperatura do pavimento T_{pav} e a deflexão medida com defletómetro de impacto, μ_t . A Figura 2.12 mostra a relação estabelecida entre as duas variáveis.

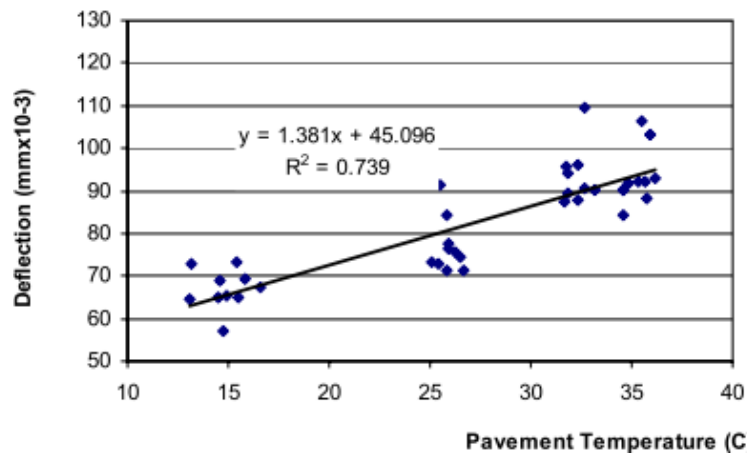


Figura 2.12 – Relação temperatura do pavimento e deflexão

Como se pode observar, a relação dá origem a uma regressão linear do tipo apresentada na Equação 2.29

$$\mu_t = 1.381 T_{pav} + 45.10 , \quad (2.29)$$

em que:

μ_t – deflexão medida com defletómetro de impacto (mm/1000);

T_{pav} – temperatura do pavimento (°C).

Assim, e como o fator corretivo é dado pela relação entre a deflexão à temperatura de ensaio e a deflexão à temperatura de referencia resulta que:

$$k = \frac{1.381 T_0 pav + 45.10}{1.381 T_{pav} + 45.10} \quad (2.30)$$

Tendo em conta que a temperatura do pavimento não foi medida diretamente, no caso da temperatura de referência ser 25°C, a Equação 2.29 será transformada consoante os dados disponíveis, nomeadamente a temperatura do ar ou a temperatura da superfície. Salienta-se que além destes dados deve ser ainda fornecida a espessura do pavimento. Assim, tendo a temperatura do ar resulta a Equação 2.31.

$$k = \frac{79.63}{\ln(0.1H+1) \times (5.581T_{ar} - 6.201)/H + 2.199T_{ar} + 17.48} \quad (2.31)$$

em que:

k – fator corretivo;

H – espessura do pavimento (m);

T_{ar} – temperatura do ar (°C).

Tendo a temperatura da superfície do pavimento, a equação resultante é a Equação 2.32, tendo os coeficientes da equação os mesmos significados da Equação 2.31, à exceção de T_{sup}, a temperatura da superfície do pavimento.

$$k = \frac{79.63}{\ln(0.1H+1) \times (2.807 T_{sup} + 51.12)/H + 1.106 T_{sup} + 40.05} \quad (2.32)$$

No que respeita ao segundo modelo enunciado, o processo de obtenção do fator corretivo é o mesmo. Note-se, no entanto, que o estudo da influência do fator tempo (momento do dia em que foi feito o ensaio) no fator corretivo revelou a insignificância da consideração deste fator.

Outro estudo que optou por relacionar a temperatura do pavimento e a deflexão medida através de um modelo linear foi Hugo et al. (2001). Com o objetivo de comparar dois processos de reabilitação diferentes, este estudo realizou ensaios com defletómetro de impacto durante dois a três dias consecutivos na mesma localização, com intervalos regulares, nos meses de Fevereiro, Maio e Agosto. Verificou-se através da análise dos dados que apenas as deflexões no ponto de aplicação da carga (denominada w1) e a uma distância de 305 mm (denominada w2) eram influenciadas pela temperatura a meio da camada betuminosa. Para temperatura de referência adotaram 25°C ou 77°F, unidade em que o modelo está calibrado. As relações obtidas foram as representadas pela Equação

2.33 e Equação 2.34, tendo em conta os pontos mais influenciados pela temperatura do pavimento.

$$W_{77}^1 = W_{T_c}^1 \times [-0.0107 \times T_c + 1.807] \quad (2.33)$$

$$W_{77}^2 = W_{T_c}^2 \times [-0.00622 \times T_c + 1.476] \quad (2.34)$$

em que:

W_{77}^1 – deflexão no ponto de aplicação da carga ajustada a 77°F;

W_{77}^2 – deflexão a 305mm da aplicação da carga ajustada a 77°F;

T_c – temperatura a meio da camada betuminosa em Fahrenheit.

A representação da variação do fator corretivo com a temperatura exposta na Figura 2.13, onde se verifica o comportamento linear dos dados.

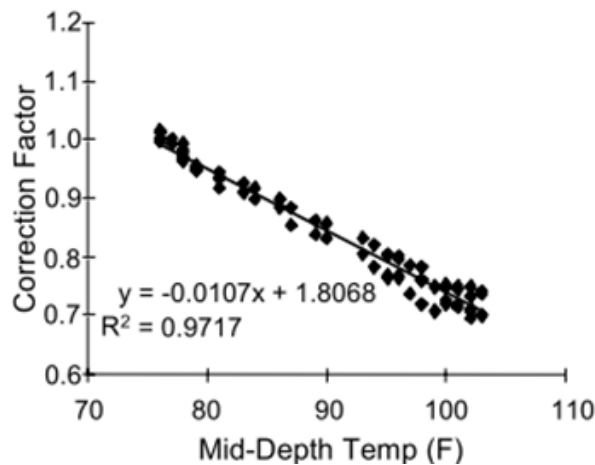


Figura 2.13 – Variação do fator corretivo com a temperatura para a secção 1

No que respeita aos estudos baseados em modelos logarítmicos salienta-se, como referido anteriormente, o trabalho de Kim et al. (2002). Neste estudo analisaram o efeito que a distância radial pode ter na relação de dependência temperatura-deflexão, tendo concluído que a influência desta distância aumenta com o aumento da espessura das camadas betuminosas. Desta forma, e por haver uma relação, o fator corretivo da temperatura e deflexão é função da localização do sensor.

A definição do fator corretivo seguiu um procedimento baseado numa análise estatística da deflexão e da temperatura medidas. Os autores sugeriram que esta relação é melhor definida se for dada como uma função linear entre o logaritmo da deflexão e a temperatura, ou seja representada pela Equação 2.35.

$$\log w = b + nT \quad (2.35)$$

Reescrevendo a equação em ordem à deflexão, w , resulta a Equação 2.36.

$$w = 10^{b+nT} \quad (2.36)$$

Sabendo que o fator corretivo define-se como o rácio entre a deflexão à temperatura de ensaio e a deflexão à temperatura de referência e substituindo na Equação 2.36 resulta que,

$$\lambda_w = \frac{w_{T_0}}{w_T} \Rightarrow \lambda_w = 10^{-n(T-T_0)} \quad (2.37)$$

Para uma carga abaixo de 40 kN os autores determinaram uma constante de regressão C , passando o fator corretivo a expressar-se como na Equação 2.38.

$$\lambda_w = 10^{-C(H_{ac})(T-T_0)} \quad (2.38)$$

em que:

λ_w – fator corretivo da deflexão;

H_{ac} – Espessura da camada betuminosa (inches);

T e T_0 – temperatura de referência e de ensaio (°F).

A constante C permitiu incluir a distância de medição da deflexão, e tendo em conta que a influência desta distância radial diminui com o aumento da distância, desenvolveram um modelo baseado em dados estatísticos tendo-se obtido o valor de C , de acordo com a Equação 2.39.

$$C = -Ar + C_0 \quad (2.39)$$

em que:

r – distância radial (m);

A e C_0 – dados consoante a região em que se insere o pavimento a estudar.

O trabalho desenvolvido por Lukanen et al. (2000) partiu do estudo da forma da bacia de deflexão obtida aquando de ensaios com defletómetro de impacto, através de fatores de forma conhecidos. Os fatores analisados no estudo foram o fator de forma da área da bacia, o fator F-1, a variação das deflexões (diferença entre o valor da deflexão medida no ponto de aplicação da carga e a deflexão a determinada distância, por exemplo $\Delta_8 = def_{10} - def_{18}$, sendo def_{10} a deflexão no centro da aplicação da carga e def_{18} a deflexão a 203mm (8 polegadas) do centro de aplicação da carga) e o rácio das deflexões. Relativamente ao fator de forma da área, corresponde ao cálculo da área normalizada da bacia de deflexão, como se pode verificar na Equação 2.40.

$$AREA = 6 \left(\frac{def_{10}}{def_{10}} + \frac{2def_{12}}{def_{10}} + \frac{2def_{24}}{def_{10}} + \frac{def_{36}}{def_{10}} \right) \quad (2.40)$$

em que:

AREA – fator de forma da área da bacia de deflexão;

def_{10} – deflexão no centro de aplicação da carga;

def_{12} – deflexão no sensor a 300 mm (12 polegadas) do centro de aplicação da carga;

def_{24} – deflexão no sensor a 600 mm (24 polegadas) do centro de aplicação da carga;

def_{36} – deflexão no sensor a 900 mm (36 polegadas) do centro de aplicação da carga.

O fator F-1 representa o valor da curvatura da bacia e é normalizado através da Equação 2.41, sendo que os fatores apresentados na equação possuem o mesmo significado que na Equação 2.40.

$$F - 1 = \frac{defl0 - defl24}{defl12} \quad (2.41)$$

Depois de seleccionada uma estação de ensaio representativa através de um processo que envolve um conjunto de regressões, e sabendo o logaritmo da forma da bacia é a variável dependente e a temperatura a meio da camada betuminosa a variável independente, a expressão que relaciona estes fatores é da forma da Equação 2.42.

$$\text{Fator de forma da bacia} = \text{Interseção} + \text{Declive} \times \text{Temperatura} \quad (2.42)$$

Através da análise dos dados obtidos concluíram que o logaritmo da espessura da camada betuminosa, a latitude, a defl36 (deflexão medida no sensor a 914 mm do centro de aplicação da carga) e as suas interações afetam a interseção e o declive da expressão. Para o desenvolvimento dos modelos de regressão foram definidos conjuntos de variáveis independentes, para o fator “interseção” e para o fator “declive” da Equação 2.42. As variáveis definidas para o fator “interseção” são $\log(ac)$; $\log(lat)$; $\log(defl36)$; $\log(ac) \times \log(lat)$; $\log(ac) \times \log(defl36)$; $\log(lat) \times \log(lat)$. Para o fator “declive” definiram-se as variáveis T ; $T \times \log(ac)$; $T \times \log(lat)$; $T \times \log(defl36)$; $T \times \log(ac) \times \log(lat)$; $T \times \log(ac) \times \log(defl36)$; $T \times \log(lat) \times \log(defl36)$.

Depois de determinadas as variáveis relevantes foram desenvolvidos os modelos de regressão, ou seja, os modelos de forma da bacia de deflexão apresentados desde a Equação 2.43 à Equação 2.56.

$$\text{AREA} = 13.0 + 7.77 \log(ac) \cdot \log(defl36) - 6.78 \log(\theta) \cdot \log(defl36) + 0.105T - 0.116T \cdot \log(ac) \quad (2.43)$$

$$\log(F - 1) = 0.326 - 0.382 \log(ac) \cdot \log(defl36) + 0.327 \log(\theta) \cdot \log(defl36) - 0.00447T + 0.00555T \cdot \log(ac) \quad (2.44)$$

$$\log(\text{delta}8) = 3.02 - 1.49 \log(ac) + 0.541 \log(\theta) + 0.394 \log(defl36) - 0.0230 T + 0.0111T \log(ac) \cdot \log(\theta) \quad (2.45)$$

$$\log(\text{delta}12) = 3.45 - 1.59 \log(\text{ac}) + 0.489 \log(\theta) + 0.449 \log(\text{defl}36) - 0.0275 T + 0.012 T \cdot \log(\text{ac}) \cdot \log(\theta) \quad (2.46)$$

$$\log(\text{delta}18) = 4.18 - 1.52 \log(\text{ac}) + 0.317 \log(\theta) \cdot \log(\text{defl}36) - 0.0265 T + 0.0112 T \log(\text{ac}) \cdot \log(\theta) \quad (2.47)$$

$$\log(\text{delta}24) = 3.30 - 1.32 \log(\text{ac}) + 0.514 \log(\theta) \cdot \log(\text{defl}36) - 0.00622 T \cdot \log(\theta) \cdot \log(\text{defl}36) + 0.00838 T \cdot \log(\text{ac}) \cdot \log(\theta) \quad (2.48)$$

$$\log(\text{delta}36) = 3.05 - 1.13 \log(\text{ac}) + 0.502 \log(\theta) \cdot \log(\text{defl}36) - 0.00487 T \cdot \log(\theta) \cdot \log(\text{defl}36) + 0.00677 T \cdot \log(\text{ac}) \cdot \log(\theta) \quad (2.49)$$

$$\log(\text{delta}60) = 2.67 - 0.770 \log(\text{ac}) + 0.650 \log(\text{delta}36) + 0.00290 T \cdot \log(\text{ac}) \quad (2.50)$$

$$\log(\text{ratio}8) = 0.183 + 0.0118 \log(\text{ac}) \cdot \log(\text{defl}36) + 0.00980 T + 0.0696 \log(\theta) - 0.133 \log(\text{ac}) - 0.00416 T \cdot \log(\text{defl}36) \quad (2.51)$$

$$\log(\text{ratio}12) = 0.200 - 0.117 \log(\text{ac}) \cdot \log(\text{defl}36) + 0.126 \log(\theta) \cdot \log(\text{defl}36) + 0.00861 T - 0.00183 T \cdot \log(\theta) \cdot \log(\text{defl}36) \quad (2.52)$$

$$\log(\text{ratio}18) = 0.952 - 0.450 \log(\text{ac}) - 0.169 \log(\text{defl}36) + 0.327 \log(\theta) + 0.00212 T \cdot \log(\text{ac}) \quad (2.53)$$

$$\log(\text{ratio}24) = 1.16 - 0.587 \log(\text{ac}) - 0.210 \log(\text{defl}36) + 0.481 \log(\theta) + 0.00257 T \cdot \log(\text{ac}) \quad (2.54)$$

$$\log(\text{ratio}36) = -0.0912 - 0.367 \log(\text{ac}) \log(\text{defl}36) + 0.489 \log(\text{defl}36) + 0.691 \log(\theta) + 0.00298 T \cdot \log(\text{ac}) \quad (2.55)$$

$$\log(\text{ratio}60) = 0.0726 + 0.336 \log(\text{ac}) \log(\text{defl}36) + 0.334 \log(\text{defl}36) + 0.872 \log(\theta) + 0.00246 T \log(\text{ac}) \quad (2.56)$$

em que:

ac – espessura total da mistura betuminosa (m);

θ – latitude da secção do pavimento;

$defl(x)$ – deflexão a (x) polegadas do centro de aplicação da carga;

$\delta(x)$ – deflexão no sensor a (x) polegadas do ponto de aplicação da carga;

$ratio(x)$ – rácio da deflexão no ponto de aplicação da carga e a (x) polegadas de distância desse ponto;

T – temperatura a meio da camada betuminosa ($^{\circ}C$);

$F-1$ – fator que representa o valor da curvatura da bacia (Equação 2.41).

Cada um dos modelos apresentados pode ser usado para cálculo de fatores de ajuste da forma da bacia de deflexão com a temperatura. Como exemplo, apresenta-se a Equação 2.57, com o fator de ajuste da deflexão (TAF) a 914 mm do ponto de aplicação da carga.

$$TAF = \frac{defl_{36} + \delta_{36} T_{emp.Ref.}}{defl_{36} + \delta_{36} T_{emp.Medida}} \quad (2.57)$$

A Figura 2.14 mostra o fator de ajuste para várias espessuras da camada betuminosa, em que as deflexões medidas forem ajustadas para deflexões a $20^{\circ}C$.

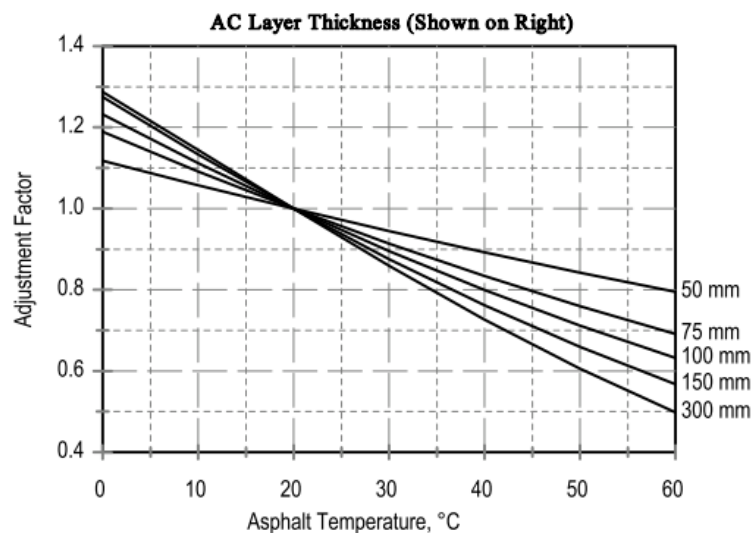


Figura 2.14 – Fatores de ajuste da temperatura para $defl_{36} = 100\mu m$ e 40° de latitude

Como se pode observar, o ábaco desenvolvido possui algumas semelhanças com o desenvolvido pela AASHTO (1993). Neste caso, através da introdução da temperatura do pavimento, no eixo das abcissas, e da espessura da camada betuminosa em estudo, correspondendo a cada curva, obtém-se o fator de ajuste no eixo das ordenadas.

2.5 Redes Neurais Artificiais (RNA)

O conceito das redes neuronais artificiais tem a sua origem, como o nome indica, nos neurónios presentes no cérebro humano, responsáveis pela memória, e na sua capacidade de processamento e aprendizagem de informação.

O aparecimento das teorias mais modernas de aprendizagem e processamento neuronal surgiu na década de 40, tendo aparecido nos anos 50 os primeiros exemplos de novos sistemas. Devido à falta de confiança neste tipo de sistema por parte da comunidade científica, as investigações nesta matéria sofreram um decréscimo até 1969, quando o lançamento do livro *Perceptrons* lançou a discussão e a pesquisa da matéria (Freeman & Skapura 1991). Atualmente, as RNA são cada vez mais utilizadas na resolução de problemas não estacionários nas mais diferentes áreas como a engenharia, ciência, educação, investigação médica, negócios, finanças, previsões entre outras.

A utilização das RNA tem algumas das vantagens de utilização reconhecidas e que valem a pena destacar (Haykin, 1994).

- Tolerância ao ruído;
- Resolução de problemas não-lineares;
- Mapeamento *input-output*: o treino da rede é repetido até que esta alcance a estabilidade, sem alterações significativas nos pesos sinápticos. A esta aprendizagem com os exemplos chama-se um mapeamento da rede;
- Adaptação: a rede tem a capacidade de adaptar os pesos às alterações no ambiente envolvente, podendo ser projetada para os alterar em tempo real;
- Informação contextualizada: cada neurónio é afetado pela atividade global de todos os neurónios da rede;

- Tolerância a falhas: em condições operativas inversas, a performance da rede sofre degradações pouco significativas.

As RNA são sistemas computadorizados que contêm um número extremamente elevado de processadores simples com conexões de dados numa direção (Jain & Mao, 1996). Em certo ponto, os *inputs* introduzidos na rede são examinados, sendo os *outputs* calculados com o auxílio de uma função de ativação. A cada conexão está associado um peso que determina a influência da ativação da célula de entrada (Gallant, 1993).

O uso das redes neuronais deverá seguir determinadas diretrizes de forma a incrementar o seu potencial, entre as quais a divisão dos dados em três conjuntos, os dados de treino (devem corresponder a 50-60% dos dados) para atualizar os pesos das conexões, um conjunto de dados para validação com o objetivo de aferir qual a melhor rede obtida durante o treino e um conjunto de dados de ensaio, para verificação da resposta da rede (Basheer & Hajmeer, 2000).

No que concerne à forma da rede, vulgarmente designada por arquitetura, salienta-se que diferentes arquiteturas requerem algoritmos de aprendizagem apropriados. As redes habitualmente podem tomar duas formas, com funcionamento “para a frente” ou *feed-forward* e as recorrentes, sendo as primeiras as mais utilizadas. Dentro deste conjunto as mais comuns são organizadas em camadas com conexões unidirecionais entre elas, designadas *multilayer-perceptron*. Este tipo de rede tem a vantagem, segundo Hornik et al. (1989) de permitir aproximar qualquer função a qualquer grau de precisão desejado, de forma muito específica e satisfatória. Na Figura 2.15 é possível distinguir os diferentes tipos de arquitetura vulgarmente utilizados.

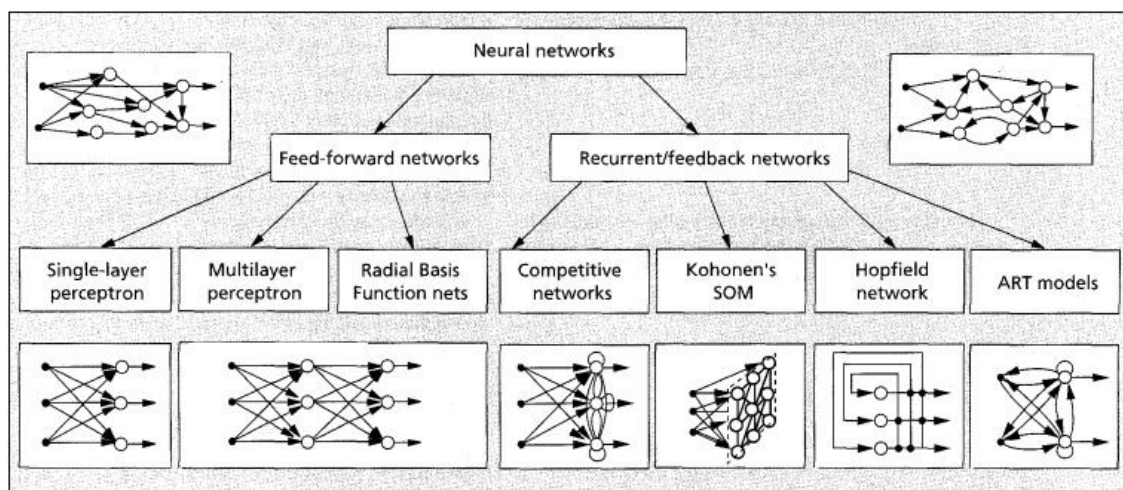


Figura 2.15 – Diferentes tipos e arquiteturas de rede (Jain & Mao, 1996)

Segundo Gallant (1993), a aprendizagem por parte das máquinas refere-se a sistemas que aumentam o seu desempenho de uma maneira significativa. Normalmente, as técnicas de aprendizagem dividem-se em supervisionada e sem supervisão. No primeiro caso, são fornecidos à rede um conjunto de exemplos de treino onde cada exemplo consiste num dado *input* e no *output* correto, dando assim uma medida do desempenho do programa. No caso das técnicas de aprendizagem não supervisionada não há uma avaliação do desempenho, sendo que sem conhecer o que constitui ou não uma resposta correta, o máximo a esperar da rede é o agrupamento de dados do mesmo tipo.

Numa rede do tipo da Figura 2.16, o funcionamento das RNA tem como base um processo de aprendizagem fundamentado na correção do erro, designado geralmente por *Backpropagation*. Os nós de origem na camada de entrada da rede fornecem os elementos para a ativação (vetor *input*) que constituem os sinais de entrada aplicados aos neurónios na segunda camada (primeira camada oculta). Os sinais de saída (*outputs*) da segunda camada são usados como entrada (*input*) para a terceira camada, e assim sucessivamente para o resto da rede. Assim, o conjunto de *outputs* dos neurónios na camada final constitui a resposta da rede ao padrão de ativação fornecido pelos *inputs* na primeira camada. O padrão de *outputs* é comparado com o desejado sendo calculado, para cada um, um sinal de erro. Este sinal de erro é depois transmitido para trás, até cada nó da camada intermédia que contribui diretamente para o output. O processo é repetido camada a camada até que cada nó da rede receba um sinal de erro que descreva a sua contribuição relativa para o erro total. Baseados no sinal do erro recebido, os

pesos são atualizados até a rede disponibilizar resultados aceitáveis (Haykin, 1994) e (Freeman & Skapura, 1991).

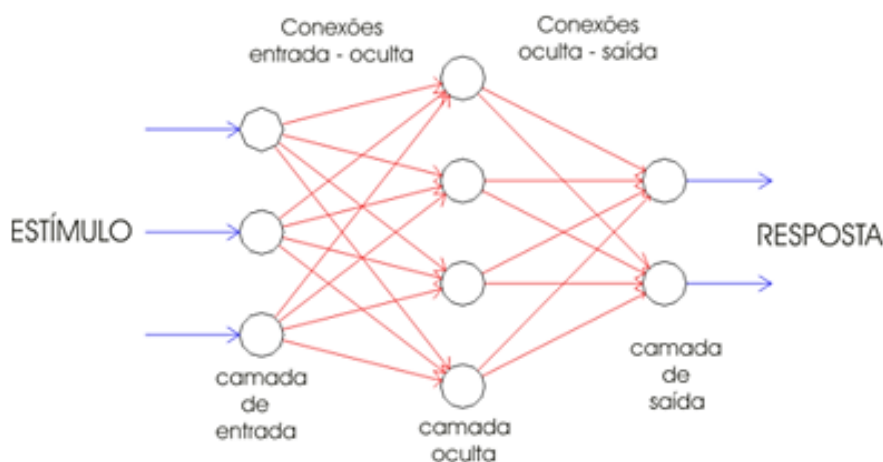


Figura 2.16 – Exemplo de rede *multilayer perceptron* (Nunes, 2003)

Relativamente à função de ativação acima mencionada, esta define o valor da ativação de um neurónio de acordo com a atividade de entrada (Haykin, 1994) participando, portanto, no cálculo dos *outputs*. Assim, um dos principais aspetos do funcionamento das RNA é a função de ativação a ser utilizada. São utilizados diferentes tipos de função, embora Braga et al. (2000) afirmem que a função deve ser não linear e diferenciável. Apresentam-se na Tabela 2.2 as funções mais comuns, sendo a mais utilizada a sigmoideal que é não linear, crescente e diferenciável.

A convergência da rede para um resultado ótimo nem sempre é fácil, entre outras razões devido à possibilidade de a rede atingir um mínimo local. Quando a rede atinge um mínimo de erro (seja ele local ou global), o processo de aprendizagem pára, e havendo a possibilidade de esse ser um mínimo local a diferença entre o output devolvido pela rede e o desejado pode ser inaceitavelmente alta. Na prática, este problema deverá ser resolvido através de uma alteração ao número de nós ocultos ou de parâmetros de aprendizagem Freeman & Skapura (1991). Por outro lado, quando a rede atinge uma boa solução não há garantias que seja o mínimo global, constituindo esta uma desvantagem das redes neuronais.

Tabela 2.2 – Tipos e representações de funções de ativação

Função	
Sigmoidal	$\frac{1}{1 + e^{-x}}$
Gaussiana	$e\left(\frac{-x^2}{2}\right)$
Linear	x
Tangente Hiperbólica	$\frac{e^t - e^{-t}}{e^t + e^{-t}}$
Secante Hiperbólica	$\frac{2}{e^t + e^{-t}}$

A preparação da rede para o funcionamento exige a definição de determinados parâmetros como a taxa de aprendizagem, *momentum* e critérios de paragem. A taxa de aprendizagem tem um efeito significativo no desempenho da rede. Geralmente deve ter um valor reduzido (entre os 0.05 e 0.25), sendo que um número muito pequeno obriga a rede a fazer um grande número de iterações, tornando o processo mais lento, e um número elevado aumenta a instabilidade em torno da solução ótima. O parâmetro *momentum* possibilita acelerar o treinamento evitando pontos de instabilidade onde ocorrem oscilações dos pesos, devendo possuir valores entre 0 e 1 (Freeman & Skapura, 1991) e (Nunes, 2003). No que respeita aos critérios de paragem, deve ser tido em conta que um grande número de iterações não significa necessariamente uma boa aproximação, uma vez que a rede pode sofrer um sobre ajustamento aos valores de treino e não se adaptar a valores diferentes. Assim, devem ser adotados critérios como o erro máximo obtido, gradiente do erro, número de iterações ou o processo de *cross-validation* (Zupan & Gasteiger, 1993).

3 Metodologia de trabalho

O capítulo referente à metodologia de trabalho tem como objetivo dar a conhecer as diferentes fases e tarefas necessárias para desenvolver os modelos de correção do módulo de rigidez de diversas misturas betuminosas e os modelos de correção da deflexão. Assim, apresenta-se a avaliação em laboratório, a modelação numérica e a avaliação *in situ* realizada neste trabalho. Relativamente à fase de estudo laboratorial, são realizadas e ensaiadas diferentes tipos de misturas betuminosas para determinação do módulo de rigidez a temperaturas e frequências distintas. A parte referente à modelação numérica tem como objetivo apresentar as diferentes fases deste estudo para o desenvolvimento do modelo de correção, nomeadamente o *software* utilizado e os parâmetros considerados no estudo. Por fim, faz-se uma apresentação do estudo *in situ* com o objetivo de validar o modelo de correção, exibindo-se as secções ensaiadas e a metodologia do ensaio.

3.1 Avaliação em laboratório

Os materiais utilizados na avaliação em laboratório incluem os materiais necessários para a produção das lajes a ensaiar, ou seja, agregados e betume, tendo em conta o tipo de mistura e a sua porosidade.

Os agregados são necessários para a formação de um esqueleto pétreo que resista à ação do tráfego, distribuindo convenientemente a carga em profundidade. A mistura dos agregados deve formar uma curva granulométrica limitada por curvas correspondentes aos limites superior e inferior pré-definidos (Branco et al., 2011).

Os agregados utilizados na produção das misturas betuminosas deste trabalho são de origem granítica, variando o tamanho dos agregados a utilizar consoante a mistura. Segundo o Caderno de Encargos das (Estradas de Portugal, 2009), os agregados devem apresentar-se homogéneos, são, pouco alterados e não devem conter matéria orgânica

ou outras substâncias como madeira, vidro ou plástico. No que respeita aos requisitos, os agregados devem seguir o disposto na norma NP EN 13043.

Relativamente ao fíler, têm esta designação todos os materiais cuja maior parte passa no peneiro 0.063 mm e que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhes conferir determinadas características. Independentemente de ser obtido por recuperação de material no fabrico de misturas betuminosas ou ser produzido em separado numa instalação industrial, o fíler deve ter origem mineral (Estradas de Portugal, 2009).

Com base na granulometria dos agregados constituintes da mistura betuminosa determinam-se as proporções dos materiais granulares a adotar, de modo a corresponder ao fuso granulométrico esperado. Neste trabalho, e uma vez que serão efetuadas três misturas diferentes com porosidades variáveis, deverão ser feitas nove formulações.

A determinação do peso total da mistura é feito tendo em conta a porosidade esperada. Com esta informação e dispondo da curva granulométrica da mistura a formular é possível a determinação do peso de cada tipo de agregado que deverá ser colocado na mistura.

Apresenta-se de seguida a curva granulométrica da mistura AC14 (Figura 3.1), da mistura AC16 (Figura 3.2) e da mistura AC20 (Figura 3.3), assim como os limites superior e inferior do fuso granulométrico a respeitar.

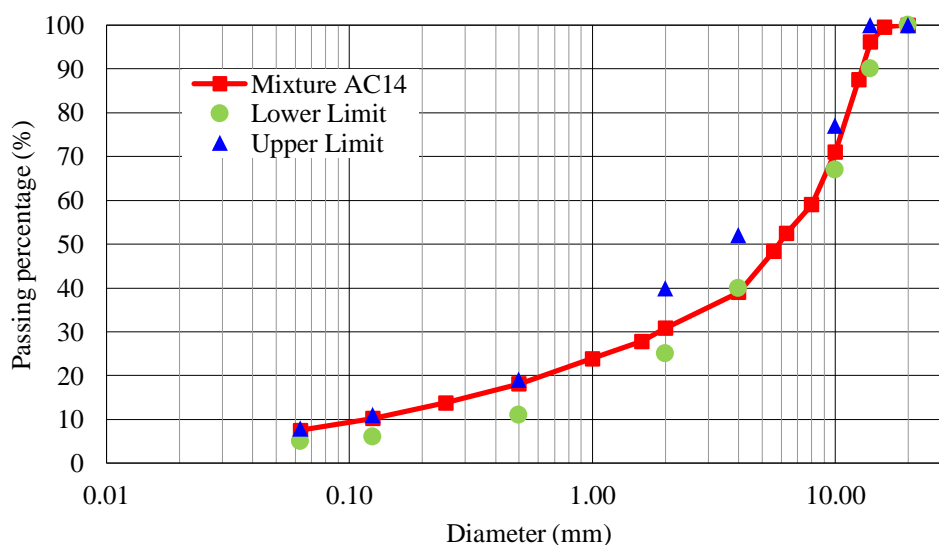


Figura 3.1 – Curva granulométrica da mistura AC14

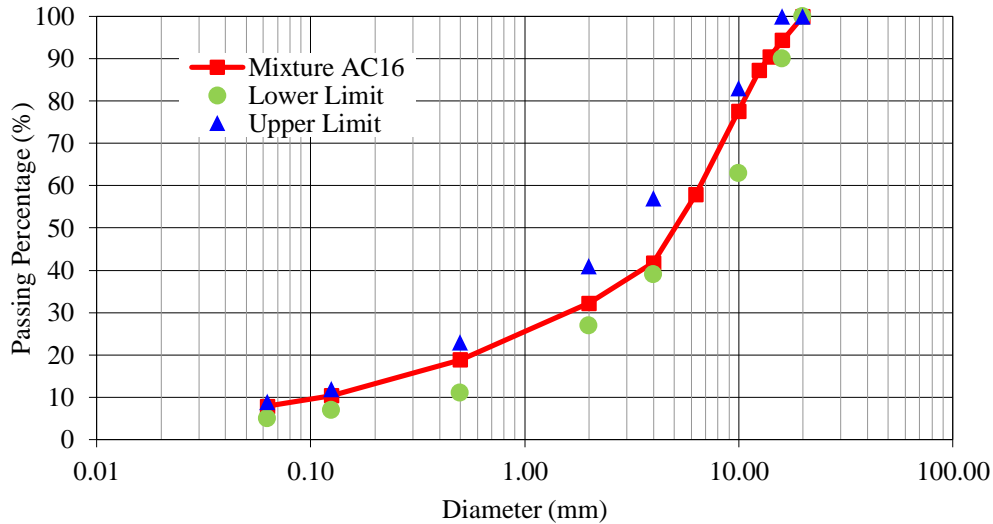


Figura 3.2 – Curva granulométrica da mistura AC16

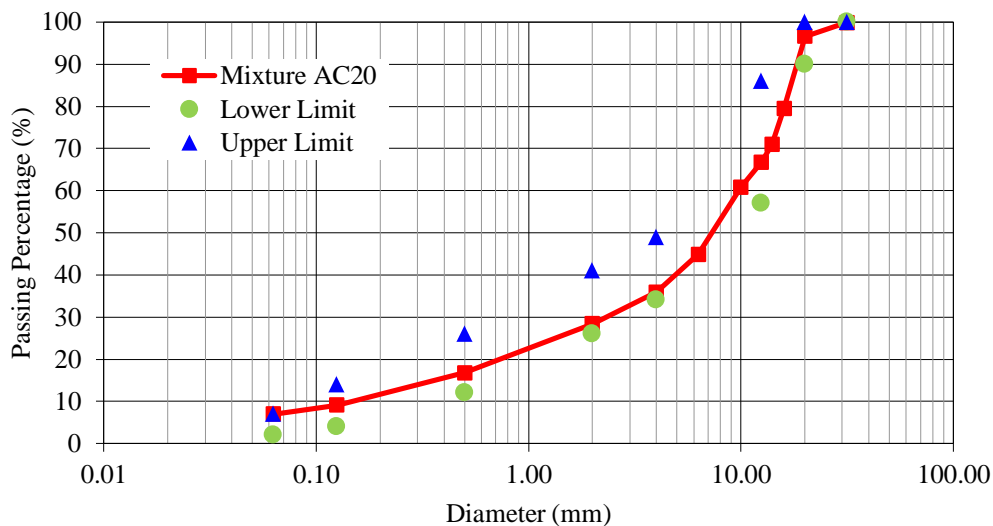


Figura 3.3 – Curva granulométrica da mistura AC20

Relativamente ao outro constituinte das misturas betuminosas, o betume, este é um material cuja consistência varia com a temperatura e é o ligante mais utilizado em pavimentação rodoviária. Possui cor negra, é não volátil, adesivo e impermeável à água e é obtido através da destilação do petróleo bruto. Este material tem como função fornecer ao solo a coesão que lhe falta, sendo que na constituição de uma mistura, a percentagem em betume varia geralmente entre 4 e 6%.

A determinação da percentagem de betume a utilizar nas misturas produzidas em laboratório é obtida recorrendo ao ensaio de Marshall (método empírico). Para este ensaio são produzidos cinco conjuntos de três provetes com temperaturas dos agregados e betume normalizados, com percentagem de betume variáveis que são compactados com um martelo normalizado. Através da determinação de parâmetros como baridade, porosidade e do ensaio de compressão de Marshall para determinar a estabilidade, determina-se a percentagem ótima de betume, que corresponde à média das percentagens da máxima estabilidade e baridade e ao valor médio dos limites da porosidade. Além destas especificações, o valor deve estar dentro dos limites impostos de deformação e VMA (Vazios da Mistura de Agregados). No caso deste trabalho a percentagem ótima de betume utilizada em cada uma das misturas betuminosas realizadas encontra-se exposta na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Percentagem de betume de cada mistura betuminosa

Mistura	Betume (%)
AC14	5
AC16	5
AC20	4.9

O betume utilizado na produção das lajes em laboratório foi do tipo 35/50. Os betumes devem cumprir os requisitos da Norma Europeia EN 12591 *Bitumen and bituminous binders – Specifications for paving grade bitumens*, apresentando-se na Tabela 3.2 algumas das especificações que o betume deve apresentar.

Tabela 3.2 – Especificações do betume 35/50 (EP, 2009)

Propriedades	Referência Normativa	Limite Mínimo	Limite Máximo
Penetração a 25°C (0.1 mm)	EN 1426	35	50
Temperatura de amolecimento (°C)	EN 1427	50	58
Viscosidade cinemática (mm ² /s)	EN 12595	370	

No que respeita à conceção da mistura, o betume deve ser utilizado quando estiver a uma temperatura de 160°C, de forma a garantir uma boa ligação e envolvimento com os agregados.

No contexto do presente trabalho, a avaliação em laboratório tem como finalidade a determinação de um modelo que permita a correção do módulo de rigidez de cada tipo de mistura à temperatura de ensaio para uma determinada temperatura de referência, função da porosidade da mistura. Optou-se por ensaiar três tipos de mistura, AC14, AC16 e AC20, uma vez que possuem características, composições e aplicações relativamente diferentes. Para cada tipo de mistura faz-se variar a porosidade, havendo 3 formulações diferentes para cada tipo de mistura. Os ensaios para determinação do módulo de rigidez são efetuados a cinco temperaturas diferentes, -10°C, 0°C, 10°C, 20°C e 30°C. Esta fase do trabalho divide-se nos passos apresentados de seguida.

Antes da conceção das misturas em laboratório é necessário proceder à sua formulação teórica, ou seja, determinar a quantidade de cada tipo de agregado e betume, consoante o tipo de mistura e a porosidade requerida. Neste estudo as formulações foram feitas tendo em consideração a porosidade para a determinação da baridade e peso total da mistura. As lajes são concebidas com 7 cm de altura, 75 cm de comprimento e 49 cm de largura, tendo portanto o molde um volume de 25725 cm³. Os primeiros passos para a conceção das misturas são a secagem dos agregados e a pesagem do material definido pela curva granulométrica. De seguida é adicionado o betume aos agregados, como se observa na Figura 3.4, sendo feita a mistura durante aproximadamente dois minutos (Figura 3.5). Uma vez que a capacidade do equipamento de mistura é de aproximadamente 30 kg, são necessárias duas amassaduras. No decorrer do processo deverão ser tidos alguns cuidados como manter a temperatura dos agregados a 180°C e temperatura do betume a 160°C.



Figura 3.4 – Introdução do betume na mistura de agregados



Figura 3.5 – Mistura de betume e agregados

De forma a manter a trabalhabilidade das misturas, durante a sua produção deverá ser tido o cuidado de manter a temperatura nos 180°C, sendo portanto a primeira amassadura colocada na estufa durante a produção da segunda amassadura. Por fim, a mistura é colocada num molde devendo ser espalhada uniformemente pelo espaço disponível com o objetivo de garantir uma densidade regular, sendo depois compactada. A compactação é uma das fases mais importantes na produção de misturas em laboratório, uma vez que poderá influenciar características como a estabilidade, resistência e deformabilidade (Azevedo, 1993). Além destas, a porosidade depende também da compactação, sendo portanto neste caso necessário cuidado adicional com esta fase do trabalho. Como é possível observar na Figura 3.6, neste trabalho a

compactação é feita com um cilindro de rolos de rasto liso, de forma a simular o trabalho em obra, sendo que a temperatura da mistura neste processo deverá ser aproximadamente 155°C. Além de ser a mais importante das fases da conceção das lajes, a compactação é também a mais complicada devido ao problema do controlo de vazios. Durante esta fase os agregados deslocam-se no molde, ficando a parte central com maior densidade tendo como consequência vigas com porosidades que variam e são diferentes do esperado. Depois de compactar a mistura no molde esta fica com o aspeto representado pela Figura 3.7.



Figura 3.6 – Molde e cilindro de rolos de rasto liso



Figura 3.7 – Mistura no molde depois da compactação

Depois de terminada a sua conceção, as lajes são cortadas em vigas de aproximadamente 38.1 cm de comprimento, 5.1 cm de altura e 6.3 cm de largura de forma a permitir o ensaio de módulo de rigidez, como se pode observar na Figura 3.8, onde é evidente a diferença na constituição das três vigas no que respeita à dimensão dos agregados.



Figura 3.8 – Provetes das três misturas: AC14, AC16 e AC20

De seguida, e de forma a conhecer a porosidade das vigas e seleccionar as três com baridade e aparência idênticas para o ensaio, é feita a medição da baridade máxima teórica e da baridade aparente de cada viga recorrendo ao método volumétrico, em que a baridade aparente é calculada tendo em conta as dimensões da viga e ao método hidrostático, sendo a baridade aparente de cada viga calculada tendo em conta o seu peso dentro e fora de água.

Na Tabela 3.3 é possível observar a porosidade média das vigas seleccionadas para o ensaio em cada, identificadas como Formulação 1, 2 e 3 para as várias porosidades definidas para cada mistura. Depois de seleccionadas, as vigas passam por uma fase de preparação antes de ser ensaiadas. Esta fase inclui a marcação do ponto a metade da altura da viga para colagem de um apoio metálico para apoio do LVDT aquando do ensaio de módulo de rigidez.

Tabela 3.3 – Percentagem do Volume de vazios das vigas a ensaiar em cada formulação

Mistura	Formulação 1	Formulação 2	Formulação 3
AC14	5.1	5.6	8.7
AC16	5.1	3.1	5.3
AC20	4.2	4.8	3.9

Depois de selecionadas as 3 vigas de cada mistura, procede-se ao ensaio de flexão em 4 pontos para determinação das características mecânicas das misturas, nomeadamente o módulo de rigidez e o ângulo de fase, às temperaturas de -10, 0, 10, 20 e 30°C. O esquema de apoio das vigas para este tipo de ensaio, segue a representação apresentada na Figura 3.9. Este ensaio é não destrutivo sendo efetuado com um equipamento servo-hidráulico (Figura 3.10) constituído por uma câmara climática, uma estrutura de carga e um grupo hidráulico, onde é aplicado um carregamento sinusoidal a frequências aplicadas por ordem decrescente de 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 8 e 10 Hz (Pais et al., 2000).

Para a realização deste ensaio deverão ser tidos alguns cuidados como manter os provetes a ensaiar pelo menos durante 2 horas à temperatura de ensaio e proteger o LVDT aquando da refrigeração das vigas a temperatura negativa.

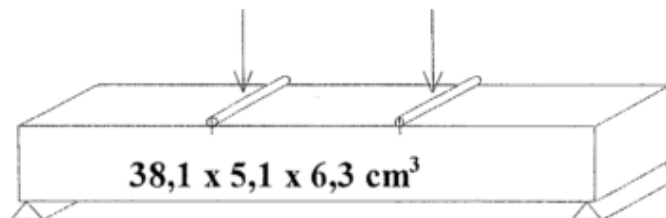


Figura 3.9 – Esquema de apoios ensaio de módulo de rigidez (Pais et al., 2000)



Figura 3.10 – Equipamento servo-hidráulico para realização dos ensaios de módulo de rigidez

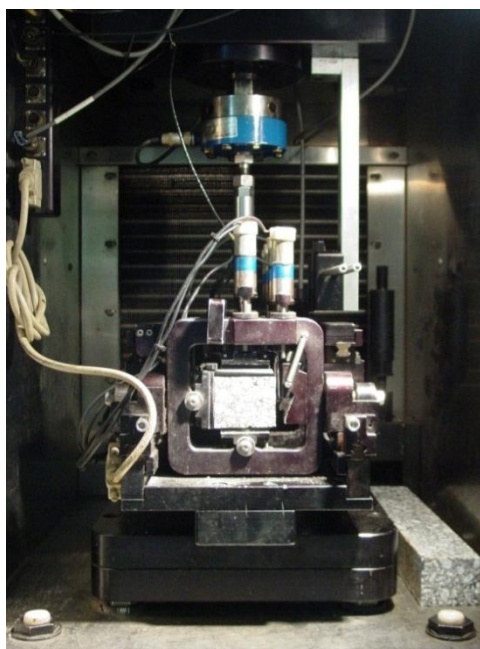


Figura 3.11 – Dispositivo de flexão em 4 pontos e introdução do provete para ensaio

Dos ensaios efetuados é possível obter o módulo de rigidez para as várias temperaturas de ensaio e para cada frequência, assim como o ângulo de fase. No Capítulo 4 são apresentados estes resultados assim como a sua análise.

3.2 Modelação numérica

A modelação numérica tem como objetivo a formulação de um modelo que permita a correção da deflexão do pavimento à temperatura de ensaio para uma temperatura de referência.

Nesta fase de modelação utilizou-se o programa JPav2.1 (Figura 3.12) onde se inserem dados como a magnitude e raio da carga, a espessura, módulo de rigidez e coeficiente de Poisson de cada camada de pavimento. Com estes dados é possível o cálculo da deflexão expectável para cada sensor do defletómetro de impacto. Adotando os valores de módulo de rigidez obtidos no estudo laboratorial para diferentes temperaturas e com as deflexões obtidas no estudo *in situ*, é possível obter um modelo de cálculo das deflexões a uma temperatura de referência devidamente calibrado com a situação real. Para este estudo optou-se por estudar um pavimento com uma camada betuminosa e uma camada granular, variando as características das camadas para as diferentes iterações.

The screenshot shows the JPav 2.1 software interface. Key sections include:

- Load definition:** A diagram shows two circular loads with radius and wheel distance. Input fields include: Number of loads (2), Magnitude of each load (20 kN), Radius (0.125 m), Wheel distance (0.375 m), and Axle distance (1.35 m). There are also buttons for 'Open data file', 'Save data file', 'Calculate', 'View results', 'Run batch file', and 'Exit'.
- Pavement constitution:** A table with columns for Layer, Thickness (m), Stiffness (MPa), Stiffness calculation, and Poisson ratio. The first four layers are populated with values: Layer 1 (0.10, 2200, 0.35), Layer 2 (0.2, 40, 0.40), Layer 3 (1, 20, 0.45), and Layer 4 (1000, 0.40).
- Design traffic:** Input fields for Vb (%), E (E-6), Life (E6), and Damage (%).
- Horizontal positions for calculation:** A grid for X and Y coordinates (0 to 10).
- Results file:** A field containing '1.res'.

Figura 3.12 – Aspeto do *software* de cálculo JPav 2.1

No que respeita aos dados adotados do ensaio, adotou-se a magnitude da carga aplicada igual a 40 kN e o raio da placa de aplicação da carga do defletómetro de impacto de 0.15m. Relativamente às características do pavimento considerou-se a espessura da

camada betuminosa com valores iguais a 0.1, 0.125, 0.15, 0.175, 0.20, 0.225, 0.25, 0.275, 0.30, 0.325, 0.35, 0.375 e 0.40 m, a espessura da camada granular igual a 0.20 m e da fundação de 1 m. Os módulos de rigidez da camada betuminosa variam consoante a temperatura e tendo em conta os resultados dos ensaios efetuados em laboratório opta-se por considerar, para a modelação numérica, os dados apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Módulos de rigidez da camada betuminosa em função da temperatura

Temperatura (°C)	Módulo de rigidez (MPa)
30	2200
20	5400
10	9500
0	13400
-10	17000

Para a camada granular considerou-se um módulo de rigidez igual ao dobro do módulo da camada de fundação, sendo que para esta última adotaram-se valores iguais a 20, 40, 60, 80, 100 e 120 MPa. Além destas camadas considerou-se uma camada rígida abaixo da fundação com objetivo de simular o solo, com um módulo de rigidez de 1000 MPa. Relativamente ao coeficiente de Poisson, uma vez que este não tem influência significativa no valor das deflexões adotou-se um valor fixo de 0.35 para as camadas betuminosas, 0.40 para as camadas granulares, 0.45 para a fundação e 0.40 para a camada rígida. O *software* permite o cálculo da deflexão a diferentes pontos horizontais. Assim, opta-se por fazer o cálculo a 0, 0.2, 0.30, 0.45, 0.60, 0.90, 1.20, 1.50, 1.80 e 2.10 metros, simulando desta forma um defletómetro de impacto e a distância a que os seus sensores medem a deflexão.

Com a diferente combinação dos dados acima mencionados foi possível obter 2269 resultados diferentes, sendo esta uma amostra significativa para a modelação numérica dos pavimentos.

3.3 Avaliação *in situ*

Nesta fase do trabalho é feita a avaliação das deflexões em três diferentes pavimentos com o defletómetro de impacto. De forma a garantir que o pavimento se encontra seco, a campanha de ensaios foi feita durante o mês de Abril e ao longo de um dia, dada a relativa proximidade entre as secções em estudo. Com os dados obtidos é possível a calibração do modelo obtido na fase de modelação numérica para o cálculo da deflexão a uma temperatura de referência, partindo da deflexão obtida à temperatura de ensaio.

O estudo das deflexões do pavimento incide sobre três secções diferentes com distintas composições da estrutura do pavimento. A secção 1 e 2 fazem parte da circular da cidade de Guimarães, tendo a secção 1 a particularidade de estar junto a um talude, fomentando assim a variação da temperatura do pavimento e permitindo ter em conta o sombreamento. A secção 2 encontra-se numa zona sem qualquer impedimento à incidência de luz solar sobre o pavimento. Relativamente à sua constituição, são pavimentos típicos deste tipo de estrada, com uma camada betuminosa de aproximadamente 0.20 m e uma camada granular da mesma espessura. No que respeita à secção 3, localiza-se na EN206. A estrada da secção em estudo não é muito solicitada em termos de volume de tráfego, possuindo assim uma espessura betuminosa reduzida com cerca de 0.09 m e uma camada granular com cerca de 0.20 m.

Depois de escolhidos os trechos a ensaiar é necessária a preparação dos materiais e equipamentos indispensáveis para a realização dos ensaios. Nesta fase é necessário medir e cortar os cabos para registo da temperatura com os termopares. No terreno é necessário perfurar o pavimento até à profundidade onde se pretende fazer a medição da temperatura. A medição é feita colocando glicerina no fundo de cada orifício de forma a permitir uma condução e homogeneização da temperatura do pavimento, como pode ser observado na Figura 3.13.



Figura 3.13 – Introdução da glicerina para medição da temperatura do pavimento

Depois de introduzida a glicerina em cada um dos orifícios são colocados os termopares para medição da temperatura, devendo ser garantido que estes não saem facilmente (Figura 3.14). Neste estudo opta-se por medir a temperatura do pavimento a aproximadamente 5, 10 e 15 cm de profundidade nas secções 1 e 2 e a profundidades de aproximadamente 5 e 10 cm na secção 3.



Figura 3.14 – Instrumentos para medição da temperatura do pavimento

A campanha de ensaios começou ao início da manhã de forma a permitir uma variação substancial da temperatura do pavimento. A primeira tarefa para este tipo de ensaio é

garantir a proteção dos intervenientes através da colocação de cones num perímetro de segurança, como é possível observar na Figura 3.15.



Figura 3.15 – Equipamento de ensaio e perímetro de segurança na secção 2

Depois de selecionado o ponto onde se pretende fazer o ensaio, é indispensável a marcação do pavimento de forma a que a carga atue sempre no mesmo local. Neste trabalho optou-se por fazer o ensaio com a carga a duas alturas de queda, sendo assim a magnitude da mesma aproximadamente 30kN para a primeira altura de queda e 70 kN para a segunda.

Durante o decorrer do ensaio é medida a temperatura do pavimento a várias profundidades (Figura 3.16) e à superfície, assim como a temperatura ambiente. Além disto é verificada a hora a que o ensaio decorre e as condições atmosféricas como a incidência solar e o vento. Salienta-se ainda a verificação do estado de degradação do pavimento (existência de fendas, pele de crocodilo, por exemplo) como um passo essencial no estudo da deflexão. Por fim, é de interesse ainda verificar se o trecho em estudo se encontra numa zona de escavação ou aterro, uma vez que esta característica poderá ter influência nos resultados obtidos.



Figura 3.16 – Ensaio com defletómetro de impacto e medição da temperatura do pavimento

Na Tabela 3.5 apresentam-se as medições da temperatura do pavimento a diferentes profundidades, da superfície do pavimento e temperatura ambiente, assim como os dados relativos ao vento e incidência solar recolhidos no ensaio efetuado na secção 1. As duas últimas variáveis estão representadas por uma escala numérica de 0 (pouca incidência solar ou sem vento) até 2 no caso da incidência solar (céu descoberto) e 3 no caso do vento (muito ventoso). Salienta-se que as medições cessaram quando a temperatura a meio da camada betuminosa atingiu os 30°C.

Tabela 3.5 – Temperaturas recolhidas durante a campanha de ensaios: secção 1

Hora	Temperatura (°C)					Incidência solar	Vento
	15 cm	11 cm	6 cm	superfície	ambiente		
08:59	20	19	18	18.7	12	0	2
10:10	24	23	24	24	26	2	0
11:02	23	23.5	26	31.3	26	2	0
13:18	28	30	34	37.8	35	2	1
14:36	28	30	35	39	24.5	1	2

Na Tabela 3.5 é possível observar que as temperaturas do pavimento e do ar foram subindo ao longo do tempo, tendo-se verificado na última medição um decréscimo na temperatura ambiente, assim como um aumento do vento. As variações da temperatura

associadas aos outros fatores descritos foram suficientes para a alteração da deflexão do pavimento ao longo do tempo, como poderá ser comprovado no Capítulo 4.

Através da observação da Tabela 3.5 verifica-se que ao início da manhã a temperatura é mais elevada à maior profundidade (15 cm), diminuindo à medida que se aproxima da superfície. Estes valores são justificados pela temperatura elevada que se fez sentir no dia anterior ao ensaio ser efetuado, tendo o calor ficado retido no interior do pavimento, enquanto que devido à temperatura reduzida durante a noite a superfície do pavimento ficou com temperatura mais baixa.

Na secção 2 o procedimento de obtenção da temperatura com os termopares foi o mesmo tendo-se obtido os resultados expostos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Temperaturas recolhidas durante a campanha de ensaios: secção 2

Hora	Temperatura (°C)					Incidência solar	Vento
	15.5 cm	11 cm	5.5 cm	superfície	ambiente		
09:19	20	19	18	19.9	15	0	2
10:21	22	22.5	23	23.5	20	2	1
11:12	22	23	25	33.3	27	2	1
13:38	27	29	34	40.8	25.5	2	1

Nesta secção verifica-se, tal como na secção 1, que a temperatura mais elevada no primeiro ensaio efetuado encontra-se à profundidade de 15.5 cm sendo que vai diminuindo à medida que se aproxima da superfície. Nos restantes ensaios verifica-se, pelo contrário, que a temperatura à superfície do pavimento aumentou (assim como a temperatura ambiente), sendo a temperatura à maior profundidade a mais baixa. Relativamente à incidência solar, no ensaio efetuado às 09:19 horas o céu estava encoberto, não se verificando nos restantes ensaios.

De seguida apresentam-se os dados relativos às temperaturas, incidência solar e vento recolhidos na secção 3.

Tabela 3.7 – Temperaturas recolhidas durante a campanha de ensaios: secção 3

Hora	Temperatura (°C)				Incidência solar	Vento
	10.5 cm	6.5 cm	superfície	ambiente		
09:55	22	21	24.8	22	2	1
10:48	23	24	28.7	23	2	1
11:39	26	27	34.5	24	2	0

Na Tabela 3.7 observa-se, tal como nas secções 1 e 2, que a temperatura do pavimento à maior profundidade (neste caso 10.5 cm) é mais elevada do que mais próximo da superfície, provavelmente devido à temperatura sentida no dia anterior. Nesta secção verifica-se que a temperatura sofreu um acréscimo significativo no último ensaio dada a proximidade das horas de maior intensidade solar e a elevada exposição do pavimento à sua incidência.

O procedimento descrito é repetido em cada um dos trechos em estudo. Além dos dados apresentados que são medidos manualmente, o equipamento de ensaio recupera algumas informações que poderão ser relevantes para diferentes tipos de estudo como os quilómetros a que são feitos os ensaios, a latitude, longitude e altitude de cada estação de ensaio.

4 Resultados

4.1 Avaliação laboratorial da rigidez das misturas betuminosas

O ensaio de flexão em 4 pontos permite obter o módulo de rigidez correspondente a cada frequência de aplicação de carga, assim como o ângulo de fase, entre outros parâmetros do ensaio. A avaliação laboratorial da rigidez das misturas betuminosas integra os resultados dos ensaios de módulo de rigidez, a formulação das curvas mestras e neste caso específico, o estudo da variação dos módulos com a temperatura.

Relativamente ao comportamento do módulo de rigidez com a variação da temperatura (Figura 4.1) e da frequência (Figura 4.2), verifica-se que este sofre uma redução com o aumento da temperatura e um aumento com o acréscimo da frequência. O módulo segue uma variação linear com a temperatura principalmente para elevadas frequências, as quais são as mais utilizadas no dimensionamento de pavimentos. Quanto à influência da frequência verifica-se que o módulo varia linearmente com o logaritmo da frequência, principalmente para temperaturas mais baixas.

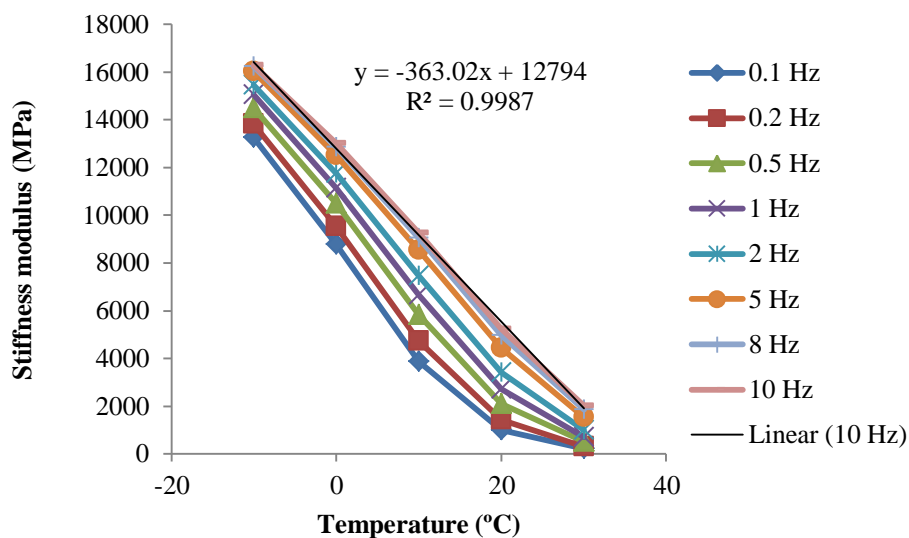


Figura 4.1 – Comportamento do módulo de rigidez com a variação da temperatura para a mistura AC14 com porosidade de 6.5%

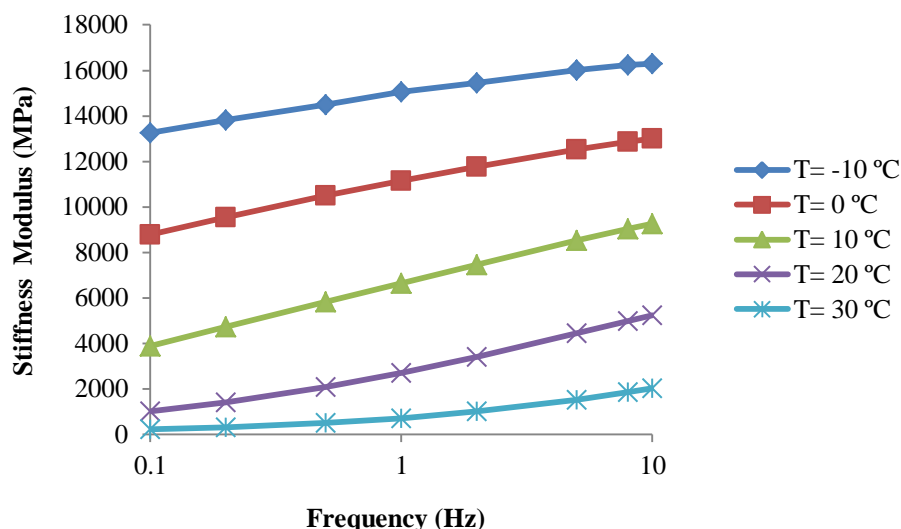


Figura 4.2 – Comportamento do módulo de rigidez com a variação da frequência para a mistura AC14 com porosidade de 6.5%

Em função da relação apresentada na Figura 4.1 para a variação do módulo de rigidez das misturas betuminosas com a temperatura, para a frequência de 10 Hz, principal frequência utilizada em termos de dimensionamento de pavimentos, neste trabalho são apresentados modelos de acordo com a Equação 4.1, sendo que o coeficiente α corresponde à variação do módulo por cada grau Celcius de variação de temperatura.

$$E = \alpha \cdot T + \beta \quad (4.1)$$

em que:

E – módulo de rigidez (MPa);

T – temperatura do ensaio (°C);

α , β – constantes função das características da mistura.

Quanto à obtenção de modelos para definição do módulo de rigidez das misturas betuminosas função de uma temperatura de referência, dada a linearidade da variação do módulo com a temperatura, os modelos de variação do módulo com a temperatura devem ser obtidos de acordo com uma equação do tipo da indicada na Equação 4.2, dada a relação indicada na Figura 4.3 em que todos os módulos estão calculados em função do módulo a 20 °C.

$$\frac{E}{E_{20}} = \gamma \cdot T + \delta \quad (4.2)$$

em que:

E – módulo de rigidez (MPa);

E₂₀ – módulo de rigidez à temperatura de 20 °C (MPa);

T – temperatura do ensaio (°C);

γ, δ – constantes função das características da mistura.

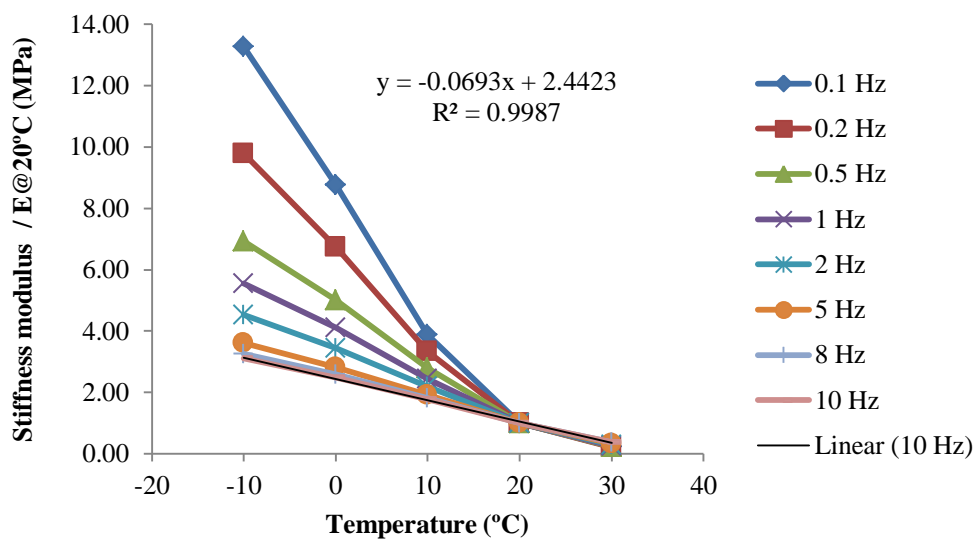


Figura 4.3 – Evolução do módulo de rigidez com a temperatura de 20°C para a mistura AC14 com porosidade de 6.5%

Com os resultados dos ensaios de módulo de rigidez para cada temperatura de ensaio é possível a determinação da curva mestra. Como referido no Capítulo 2, estas curvas são obtidas pela translação das curvas de módulo de rigidez-frequência a uma determinada temperatura de ensaio, para uma mesma curva a uma temperatura de referência, tendo-se utilizado neste trabalho a temperatura de 20°C, obtendo-se curvas mestras como a indicada na Figura 4.4.

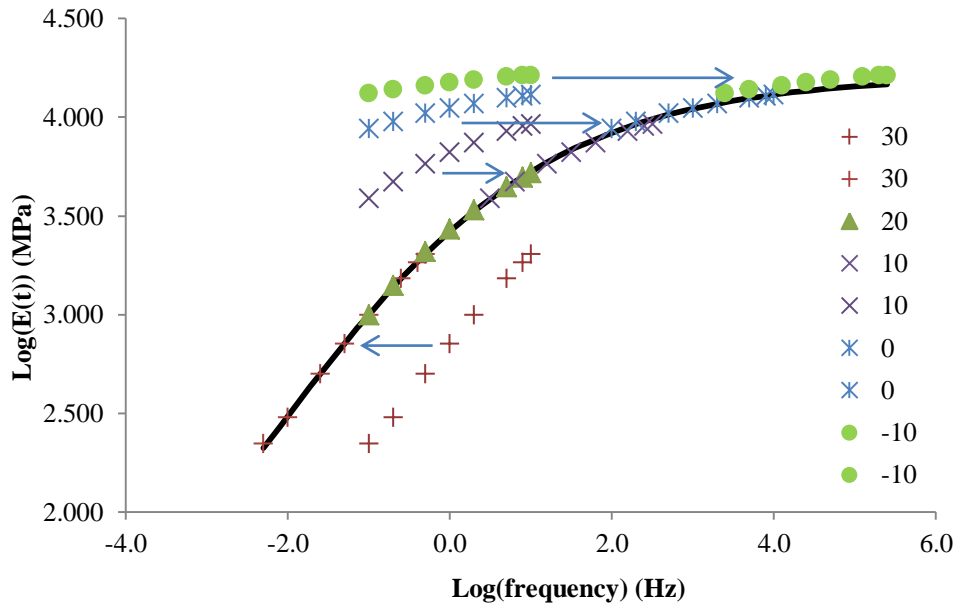


Figura 4.4 – Exemplo de obtenção de curva mestra

O *shift factor* ou fator de escala para cada temperatura pode ser representado função da temperatura obtendo-se uma variação linear como a observada na Figura 4.5.

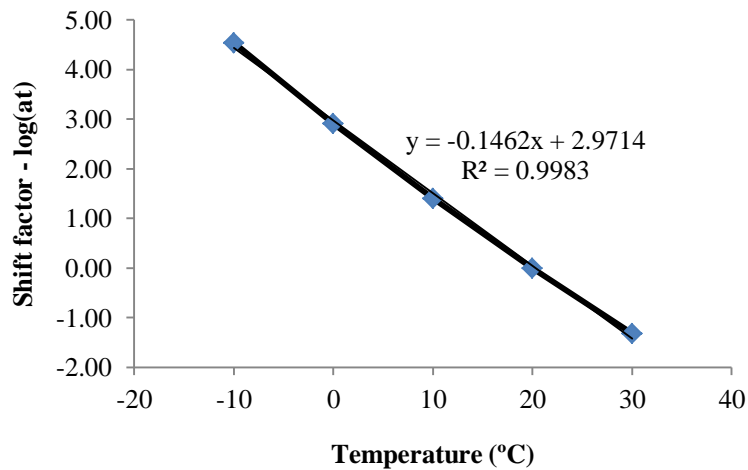


Figura 4.5 – Evolução do *shift factor* com a temperatura

Como é possível verificar na Figura 4.5 o *shift factor* pode ser caracterizado por uma relação linear como a apresentada na Equação 4.3.

$$\log(aT) = \alpha.T + \beta \tag{4.3}$$

em que:

a_T – *shift factor*;

T – temperatura do ensaio (°C);

α, β – constantes função das características da mistura.

Conhecendo o *shift factor* para cada temperatura de ensaio é possível representa-los através da equação Arrhenius (Equação 4.4), a qual necessita apenas da *Energia de ativação* (E_a) para a sua completa definição ou através da equação de WLF (Equação 4.5), a qual necessita apenas das constantes C_1 e C_2 para a sua completa definição,

$$\log[a(T)] = 2.303 \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (4.4)$$

em que:

T – temperatura do ensaio (K);

T_R – temperatura de referência (K);

E_a – energia de ativação (J/mol);

R – constante do gás universal (8.314 J/Kmol).

$$\log[a(T)] = \frac{C_1(T-T_R)}{C_2+(T-T_R)} \quad (4.5)$$

em que:

T – temperatura do ensaio (°C);

T_R – temperatura de referência (°C);

C_1 e C_2 – constantes.

Quanto à curva mestra, esta pode ser representada utilizando diferentes expressões como são exemplo a Equação 4.6, Equação 4.7 e Equação 4.8.

$$\text{Log}(E) = a + \frac{b}{1 + \frac{1}{\exp(d+e(\log(fr)))}} \quad (4.6)$$

$$\text{Log}(E) = a_1 + \frac{a_2}{\left\{ a_3 + \frac{a_4}{\exp[a_5 + a_6 \log_{10}(fr)]} \right\}} \quad (4.7)$$

$$\text{Log}(E) = \delta + \frac{\alpha}{[1 + \lambda e^{(\beta + \gamma(\log \omega))}]^{1/\gamma}} \quad (4.8)$$

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos para cada mistura estudada neste trabalho.

4.1.1 Mistura AC14

A Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3 apresentam os valores médios obtidos para os módulos de rigidez da mistura AC14 em função da porosidade da mistura (n), da frequência e da temperatura do ensaio obtidos nos ensaios de flexão em 4 pontos. Salienta-se que os resultados são apresentados pela ordem em que as misturas foram formuladas e ensaiadas.

Tabela 4.1 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC14 com n= 6.5%

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)				
	-10	0	10	20	30
0.1	13267	8768	3875	999	222
0.2	13833	9537	4730	1412	303
0.5	14503	10492	5834	2092	501
1	15053	11141	6652	2711	711
2	15462	11756	7454	3407	1000
5	16023	12513	8526	4432	1523
8	16236	12848	9038	4974	1843
10	16290	13005	9265	5239	2022

Tabela 4.2 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC14 com n= 5.6%

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)				
	-10	0	10	20	30
0.1	14381	9507	4105	1102	234
0.2	15015	10345	4942	1523	334
0.5	15801	11397	6159	2279	534
1	16373	12121	7090	2940	772
2	16939	12761	7994	3712	1078
5	17563	13589	9155	4833	1642
8	17847	13954	9725	5430	1997
10	17947	14125	9992	5711	2195

Tabela 4.3 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC14 com n= 8.7%

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)				
	-10	0	10	20	30
0.1	13104	8055	3717	920	207
0.2	13729	8952	4521	1338	293
0.5	14461	9937	5612	1973	459
1	15026	10667	6470	2582	644
2	15521	11373	7320	3253	888
5	16145	12201	8358	4274	1377
8	16378	12596	8876	4820	1682
10	16522	12756	9091	5079	1840

As curvas mestras para as misturas AC14 são representadas pelos valores indicados na Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3, respetivamente para as porosidades de 6.5%, 5.6% e 8.7%. Neste trabalho não é realizada uma comparação dos valores obtidos para as várias curvas mestras dada a complexidade de que isto se reveste, no entanto estes valores podem ser utilizados para caracterização de misturas com idênticas características.

Tabela 4.4 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC14 com n=6.5%

Equação 4.3, 4.4, 4.5		Equação 4.6		Equação 4.7		Equação 4.8	
α	-0.144	a	0.49805	a_1	-0.48208	δ	-0.06439
β	2.960	b	3.71057	a_2	5.49135	α	4.34608
Ea	42269	D	1.31220	a_3	1.15324	λ	0.70956
C_1	-39.79	e	0.58377	a_4	3.16252	β	-1.42736
C_2	293.75			a_5	2.51890	γ	-0.49925
				a_6	0.50586		

Tabela 4.5 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC14 com n= 5.6%

Equação 4.3, 4.4, 4.5		Equação 4.6		Equação 4.7		Equação 4.8	
α	-0.150	a	0.54973	a_1	-0.63422	δ	-0.05500
β	3.080	b	3.69657	a_2	5.61717	α	4.37549
Ea	42271	d	1.2995	a_3	1.13472	λ	0.56508
C_1	-23.60	e	0.58177	a_4	3.1529	β	-1.44355
C_2	171.54			a_5	2.57464	γ	-0.4798
				a_6	0.49287		

Tabela 4.6 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC14 com n= 8.7%

Equação 4.3, 4.4, 4.5		Equação 4.6		Equação 4.7		Equação 4.8	
α	-0.156	a	0.74257	a_1	-0.5619	δ	-0.0606
β	3.200	b	3.45434	a_2	5.60071	α	4.3208
Ea	42893	d	1.18778	a_3	1.16313	λ	0.5934
C_1	-23.94	e	0.59948	a_4	3.16629	β	-1.4401
C_2	172.10			a_5	2.53788	γ	-0.4906
				a_6	0.50482		

Quanto à representação gráfica das curvas mestras, na Figura 4.6 apresenta-se a comparação das curvas mestras das misturas AC14 sendo possível observar a reduzida diferença devido à porosidade. No entanto verifica-se divergência das curvas, no sentido da redução do módulo, com o aumento da porosidade, especialmente no que respeita às frequências mais elevadas.

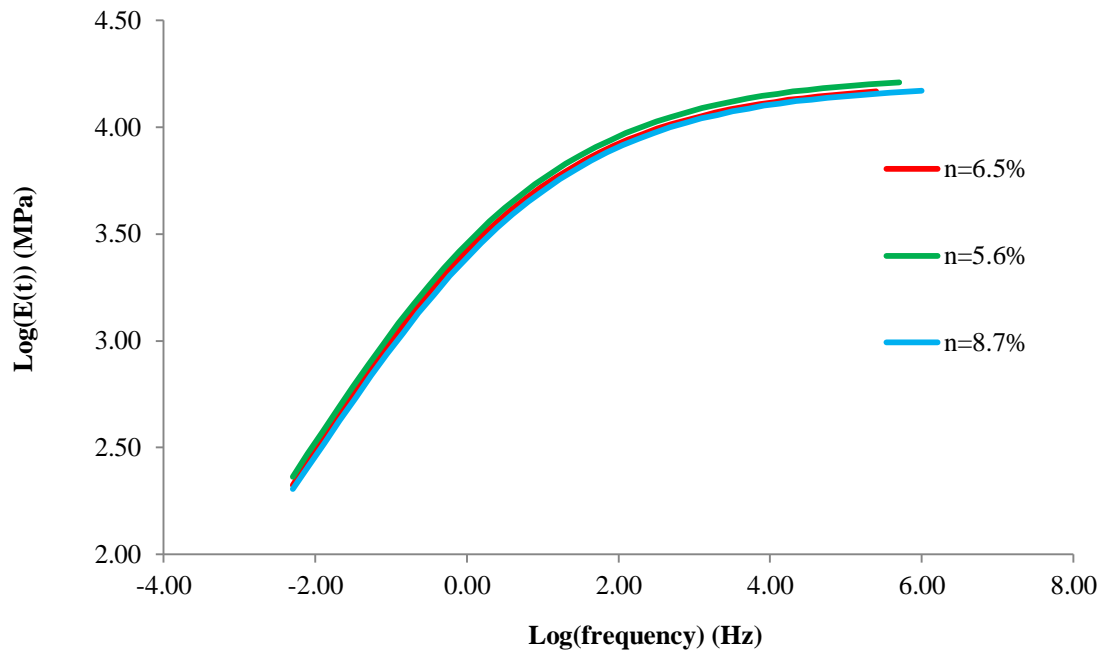


Figura 4.6 – Comparação das curvas mestras da mistura AC14

Os modelos de variação do módulo de rigidez das misturas betuminosas função da temperatura são indicados na Tabela 4.7 para a mistura AC14, podendo-se concluir principalmente que o módulo de rigidez varia aproximadamente 370 MPa por cada grau Celsius de variação da temperatura, não havendo grande influência da porosidade nesta variação.

Tabela 4.7 – Modelo de variação da rigidez da mistura AC14 com a temperatura

Porosidade (%)	$E = \alpha \cdot T + \beta$		$\frac{E}{E_{20}} = \gamma \cdot T + \delta$	
	α	β	γ	δ
6.5	-363.0	12794	-0.069	2.442
5.6	-399.2	13986	-0.070	2.449
8.8	-370.4	12761	-0.073	2.513

4.1.2 Mistura AC16

A Tabela 4.8, Tabela 4.9 e Tabela 4.10 apresentam os valores médios obtidos para os módulos de rigidez da mistura AC16 em função da porosidade da mistura (n), da frequência e da temperatura do ensaio obtidos nos ensaios de flexão em 4 pontos.

Tabela 4.8 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC16 com n= 5.1%

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)				
	-10	0	10	20	30
0.1	13789	9176	4179	1086	268
0.2	14358	9955	5027	1494	368
0.5	15077	10908	6161	2192	580
1	15618	11550	6988	2849	806
2	16051	12144	7772	3573	1106
5	16616	12927	8829	4632	1664
8	16842	13274	9172	5194	2015
10	16911	13423	9543	5463	2191

Tabela 4.9 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC16 com n= 3.1%

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)				
	-10	0	10	20	30
0.1	14932	9921	4518	1154	264
0.2	15575	10767	5392	1603	359
0.5	16348	11826	6635	2357	580
1	16941	12578	7587	3068	815
2	17478	13220	8478	3842	1136
5	18137	14066	9651	5000	1721
8	18418	14495	10006	5619	2096
10	18508	14654	10471	5912	2290

Tabela 4.10 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC16 com n= 5.3%

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)				
	-10	0	10	20	30
0.1	13609	8591	3916	1078	251
0.2	14304	9472	4759	1475	333
0.5	15051	10491	5902	2165	533
1	15635	11207	6783	2798	747
2	16184	11906	7625	3500	1026
5	16824	12757	8744	4565	1573
8	17153	13133	8979	5139	1910
10	17264	13310	9503	5331	2077

As curvas mestras para as misturas AC16 são representadas pelos valores indicados na Tabela 4.11, Tabela 4.12 e Tabela 4.13, respectivamente para as porosidades de 5.1%, 3.1% e 5.3%. Neste trabalho não é realizada uma comparação dos valores obtidos para as várias curvas mestras dada a complexidade de que isto se reveste, no entanto estes valores podem ser utilizados para caracterização de misturas com idênticas características.

Tabela 4.11 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC16 com n=5.1%

Equação 4.3, 4.4, 4.5		Equação 4.6		Equação 4.7		Equação 4.8	
α	-0.150	a	0.82125	a_1	0.02721	δ	0.09439
β	3.030	b	3.39932	a_2	5.03105	α	4.18677
Ea	42193	d	1.22808	a_3	1.18147	λ	1.08639
C_1	-21.98	e	0.58762	a_4	3.17241	β	-1.3837
C_2	159.08			a_5	2.39515	γ	-0.52171
				a_6	0.50901		

Tabela 4.12 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC16 com n= 3.1%

Equação 4.3, 4.4, 4.5		Equação 4.6		Equação 4.7		Equação 4.8	
α	-0.150	a	0.84934	a_1	-0.02011	δ	0.08149
β	3.080	b	3.40545	a_2	5.05189	α	4.23805
Ea	42208	d	1.21291	a_3	1.16439	λ	0.90785
C_1	-22.29	e	0.6017	a_4	3.18375	β	-1.39704
C_2	161.41			a_5	2.42285	γ	-0.51656
				a_6	0.51958		

Tabela 4.13 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC16 com n= 5.3%

Equação 4.3, 4.4, 4.5		Equação 4.6		Equação 4.7		Equação 4.8	
α	-0.156	a	0.61655	a_1	-0.03001	δ	0.00699
β	3.200	b	3.60775	a_2	5.04626	α	4.27202
Ea	42790	d	1.26439	a_3	1.1752	λ	0.57434
C_1	-24.75	e	0.57202	a_4	3.18529	β	-1.44749
C_2	179.05			a_5	2.41748	γ	-0.48394
				a_6	0.51901		

Quanto à representação gráfica das curvas mestras, na Figura 4.7 apresenta-se a comparação das curvas mestras das misturas AC16 sendo possível observar a reduzida diferença devido à porosidade. Em relação às misturas com 5.1% e 5.3% de porosidade, verifica-se que elas apresentam comportamento idêntico dada a extrema reduzida variação da porosidade. No entanto verifica-se o descolamento das curvas, no sentido da redução do módulo, com o aumento da porosidade, principalmente no que respeita às frequências de aplicação da carga mais elevadas.

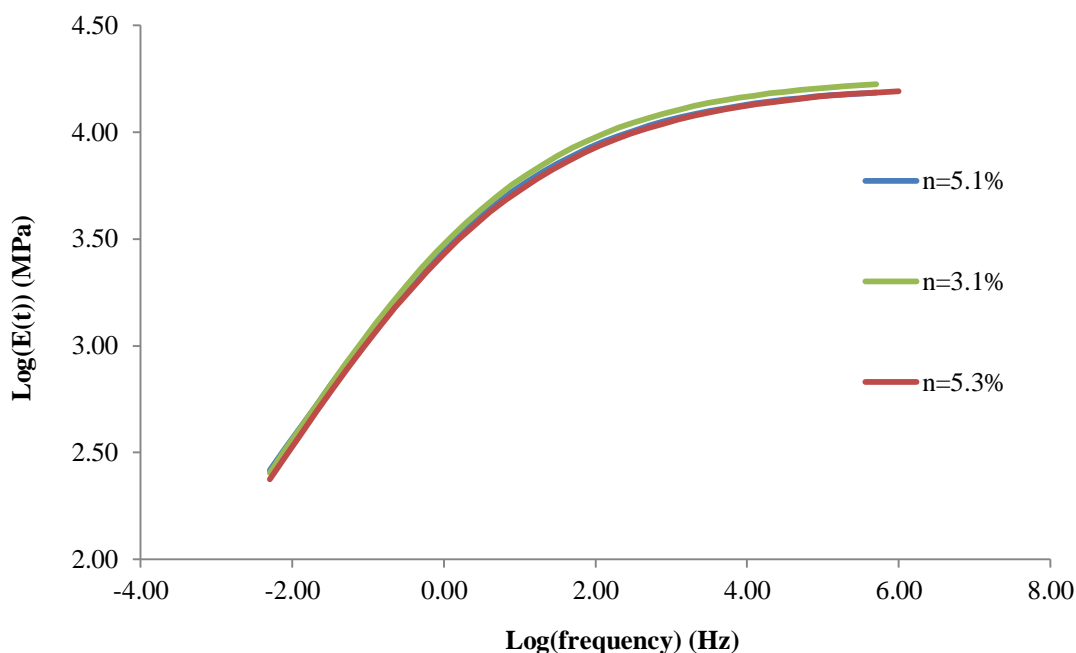


Figura 4.7 – Comparação das curvas mestras da mistura AC16

Os modelos de variação do módulo de rigidez das misturas betuminosas função da temperatura são indicados na Tabela 4.7 para a mistura AC16, podendo-se concluir principalmente que o módulo de rigidez varia aproximadamente 370 MPa por cada grau Celcius de variação da temperatura, para as misturas com aproximadamente 5% de porosidade e aproximadamente 410 MPa para a mistura com 3.1% de porosidade.

Tabela 4.14 – Modelo de variação da rigidez da mistura AC16 com a temperatura

Porosidade (%)	$E = \alpha \cdot T + \beta$		$\frac{E}{E_{20}} = \gamma \cdot T + \delta$	
	α	β	γ	δ
5.1	-374.0	13246	-0.068	2.425
3.1	-411.8	14485	-0.070	2.450
5.3	-383.5	13332	-0.072	2.501

4.1.3 Mistura AC20

A Tabela 4.15, Tabela 4.16 e Tabela 4.17 apresentam os valores médios obtidos para os módulos de rigidez da mistura AC20 em função da porosidade da mistura (n), da frequência e da temperatura do ensaio obtidos nos ensaios de flexão em 4 pontos.

Tabela 4.15 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC20 com n= 4.2%

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)				
	-10	0	10	20	30
0.1	14153	9629	4318	1115	268
0.2	14720	10398	5212	1553	384
0.5	15407	11354	6372	2292	590
1	15961	12019	7258	2985	818
2	16374	12612	8077	3740	1124
5	16892	13387	9275	4864	16454
8	17127	13748	9489	5465	2056
10	17193	13865	9778	5742	2250

Tabela 4.16 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC20 com n= 4.8%

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)				
	-10	0	10	20	30
0.1	14375	9271	3840	997	225
0.2	15012	10182	4732	1407	322
0.5	15776	11257	5830	2097	518
1	16309	12003	6864	2760	736
2	16859	12693	7766	3509	1018
5	17484	13542	8959	4624	1583
8	17711	13927	9544	5241	1911
10	17821	14108	9781	5510	2102

Tabela 4.17 – Média dos módulos de rigidez (MPa) para mistura AC20 com n= 3.9%

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)				
	-10	0	10	20	30
0.1	15366	10041	4801	1366	342
0.2	16009	10997	5722	1838	452
0.5	16816	12016	6989	2664	676
1	17378	12796	7939	3400	942
2	17926	13516	8870	4213	1272
5	18598	14370	10057	5431	1910
8	18823	14765	10710	6067	2309
10	18925	14952	10869	6377	2513

As curvas mestras para as misturas AC20 são representadas pelos valores indicados na Tabela 4.18, Tabela 4.19 e Tabela 4.20, respetivamente para as porosidades de 4.2%, 4.8% e 3.9%. Neste trabalho não é realizada uma comparação dos valores obtidos para as várias curvas mestras dada a extrema complexidade que isto se reveste, sendo que estes valores podem ser utilizados, no entanto, para caracterização de misturas com idênticas características.

Tabela 4.18 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC20 com n=4.2%

Equação 4.3, 4.4, 4.5		Equação 4.6		Equação 4.7		Equação 4.8	
α	-0.150	a	1.02415	a_1	0.16612	δ	0.28302
β	3.080	b	3.20291	a_2	4.97543	α	3.99763
Ea	42876	d	1.16259	a_3	1.20762	λ	1.25602
C_1	-21.98	e	0.61337	a_4	3.1822	β	-1.3237
C_2	159.08			a_5	2.35625	γ	-0.5506
				a_6	0.52825		

Tabela 4.19 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC20 com n= 4.8%

Equação 4.3, 4.4, 4.5		Equação 4.6		Equação 4.7		Equação 4.8	
α	-0.150	a	0.64693	a_1	0.01593	δ	0.23677
β	3.080	b	3.60185	a_2	5.03717	α	4.08136
Ea	42020	d	1.23146	a_3	1.17319	λ	0.54948
C_1	-23.67	e	0.58284	a_4	3.18584	β	-1.3375
C_2	172.44			a_5	2.35042	γ	-0.48473
				a_6	0.51391		

Tabela 4.20 – Coeficientes da curva mestra da mistura AC20 com n= 3.9%

Equação 4.3, 4.4, 4.5		Equação 4.6		Equação 4.7		Equação 4.8	
α	-0.150	a	0.87335	a_1	-0.02462	δ	0.31164
β	3.080	b	3.38969	a_2	5.09039	α	4.02562
Ea	43492	d	1.27257	a_3	1.16777	λ	0.6778
C_1	-24.70	e	0.58533	a_4	3.15233	β	-1.40386
C_2	174.65			a_5	2.46029	γ	-0.4896
				a_6	0.49978		

Quanto à representação gráfica das curvas mestras, na Figura 4.8 apresenta-se a comparação das curvas mestras das misturas AC20 sendo possível observar a reduzida diferença devido à porosidade. No entanto verifica-se o descolamento das curvas, no sentido da redução do módulo, com o aumento da porosidade, neste caso especialmente no que respeita às frequências de aplicação da carga mais reduzidas.

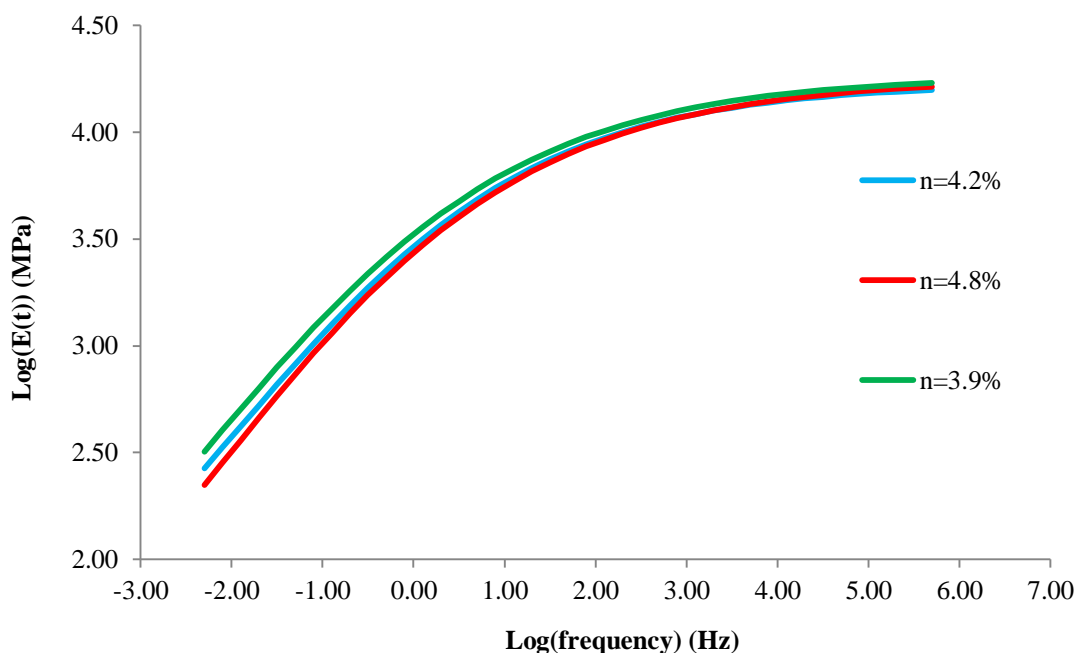


Figura 4.8 – Comparação das curvas mestras da mistura AC20

Os modelos de variação do módulo de rigidez das misturas betuminosas função da temperatura são indicados na Tabela 4.21 para a mistura AC20, podendo-se concluir principalmente que o módulo de rigidez varia aproximadamente 400 MPa por cada grau Celsius de variação da temperatura, não havendo grande influência da porosidade nesta variação.

Tabela 4.21 – Modelo de variação da rigidez da mistura AC20 com a temperatura

Porosidade (%)	$E = \alpha \cdot T + \beta$		$\frac{E}{E_{20}} = \gamma \cdot T + \delta$	
	α	β	γ	δ
4.2	-380.1	13566	-0.066	2.363
4.8	-400.4	13868	-0.073	2.517
3.9	-414.0	14867	-0.065	2.331

A análise dos resultados da variação do módulo de rigidez das misturas betuminosas com a temperatura permitiu concluir que por cada grau Celsius o módulo de rigidez das misturas betuminosas varia em média aproximadamente 390 MPa/°C, sendo este valor variável função da mistura, da porosidade e da rigidez da mistura como se observa na Figura 4.9 e Figura 4.10.

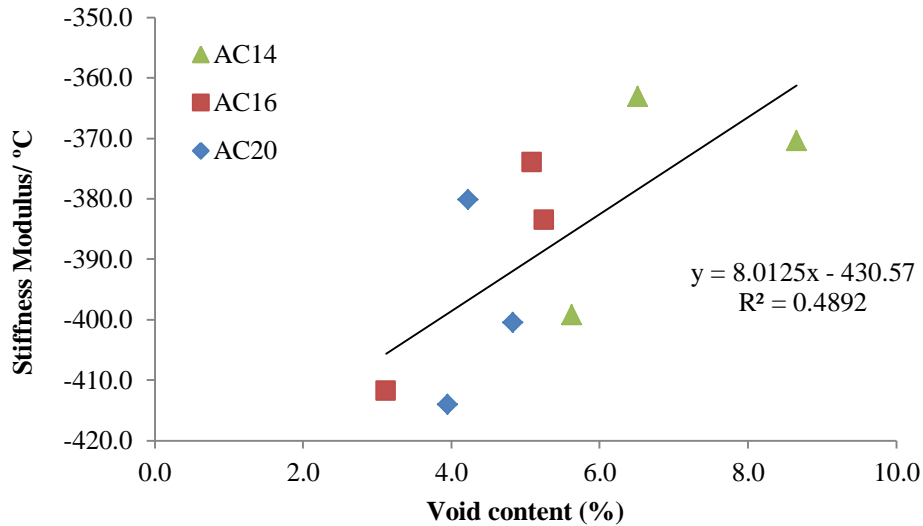


Figura 4.9 – Influência da porosidade na variação do módulo com a temperatura

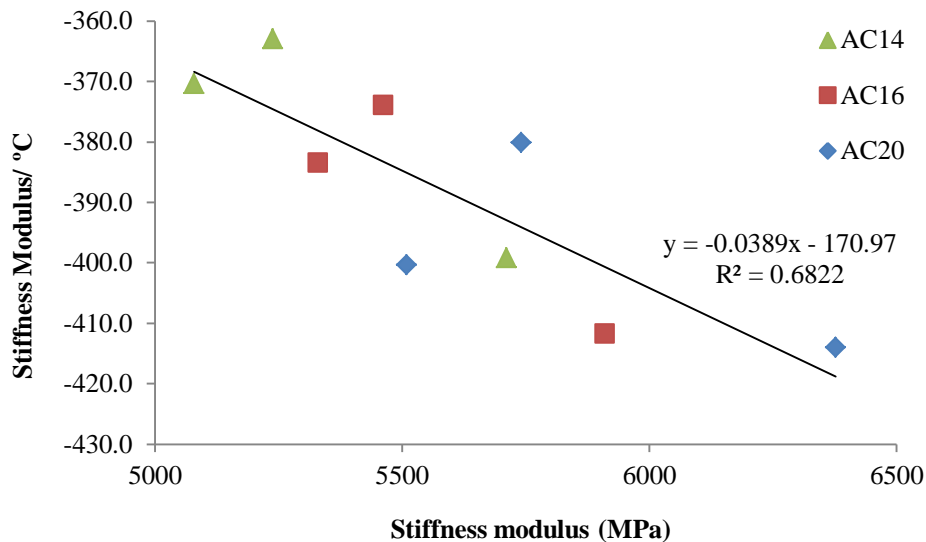


Figura 4.10 – Influência do módulo na variação do módulo com a temperatura

O segundo objetivo dos ensaios laboratoriais de determinação do módulo de rigidez das misturas betuminosas consistia na determinação de um modelo para representar o módulo com a porosidade. Para a determinação desse modelo partiu-se da curva mestra, na forma indicada na Equação 4.6 (forma mais simples das apresentadas neste trabalho) apresentando-se na Figura 4.11 a representação dos coeficientes dessa equação função da porosidade, verificando-se não ser possível expressar a sua variação com a porosidade pelo que o desenvolvimento de tal modelo não foi possível de ser realizada.

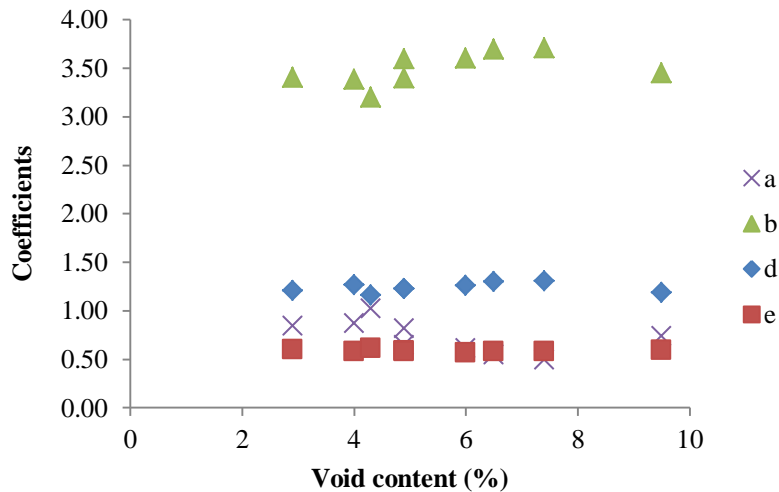


Figura 4.11 – Coeficientes da Equação 4.6 para as misturas ensaiadas

4.2 Modelo de correção das deflexões

A introdução de dados como o módulo de rigidez das camadas de pavimento, a espessura e as características do ensaio com defletómetro de impacto, para várias temperaturas, permite ao *software* de cálculo JPav2.1 determinar as deflexões do pavimento a várias distâncias da aplicação da carga. Assim, é possível também nesta fase a obtenção de defletogramas do pavimento, percebendo como o seu comportamento com a variação da espessura da camada betuminosa, módulo de rigidez da fundação, temperatura do pavimento e distância ao ponto de aplicação da carga.

A importância da temperatura da camada betuminosa do pavimento é observável através dos defletogramas apresentados na Figura 4.12 e Figura 4.13, para 5 temperaturas da camada betuminosa (-10 °C a 30 °C) para um pavimento com 10 cm de espessura betuminosa e fundação com 20 MPa e 120 MPa respetivamente. A análise destas figuras permite observar que a temperatura da camada betuminosa conduz a diferentes defletogramas, principalmente na sua parte inicial, sendo que esta influência aumenta com a diminuição do módulo da fundação.

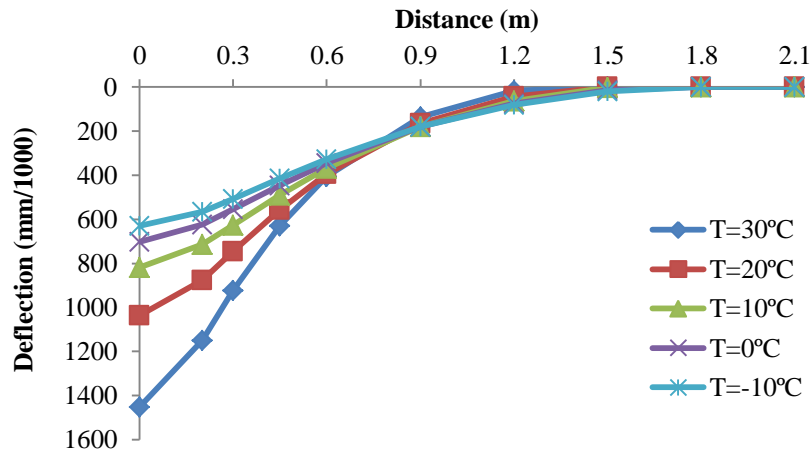


Figura 4.12 – Defletogramas para pavimento com 0.10 m de espessura betuminosa e fundação com 20 MPa

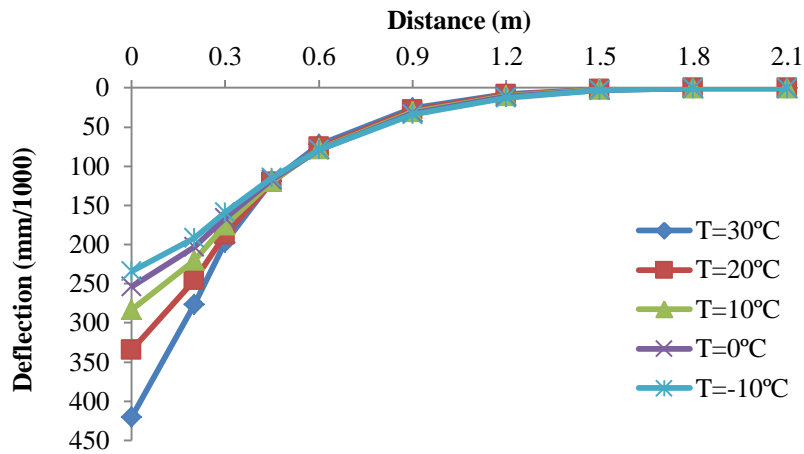


Figura 4.13 – Defletogramas para pavimento com 0.10 m de espessura betuminosa e fundação com 120 MPa

Análise idêntica pode ser observada para os defletogramas obtidos para um pavimento com 40 cm de espessura da camada betuminosa, como se observa na Figura 4.14 e Figura 4.15, sendo possível observar a variação do defletograma tanto em termos de magnitude como extensão.

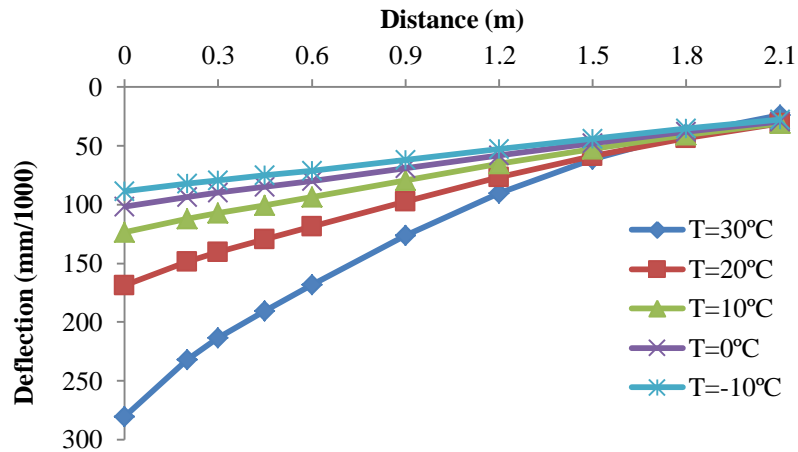


Figura 4.14 – Defletogramas para pavimento com 0.40 m de espessura betuminosa e fundação com 20 MPa

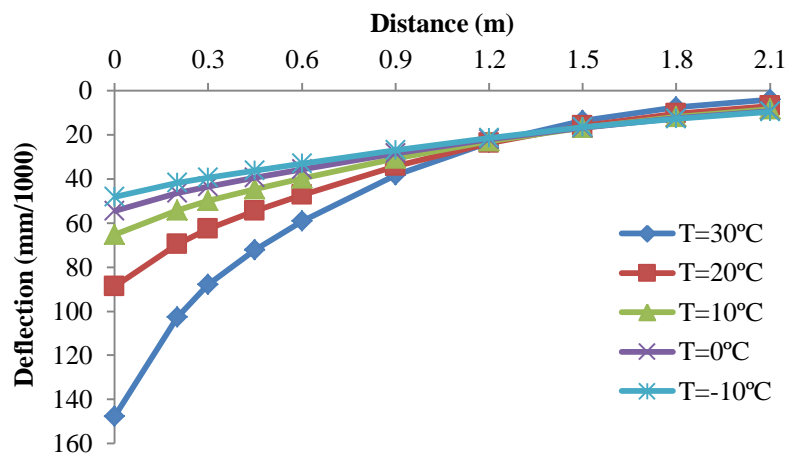


Figura 4.15 – Defletogramas para pavimento com 0.40 m de espessura betuminosa e fundação com 120 MPa

Para o desenvolvimento de um modelo para correção das deflexões do pavimento foi obtido, recorrendo ao programa JPav, os defletogramas do pavimento para as seguintes condições:

- Espessura betuminosa: 0.10 a 0.40 m (variação de 0.025m);
- Rigidez da fundação: 20 a 120 MPa (variação de 20 MPa);
- Temperatura da camada betuminosa: -10 a 30 °C (variação de 10 °C);
- Camada granular com 0.20 m e módulo igual ao dobro da fundação;

- Distância ao ponto de aplicação da carga correspondente ao defletómetro de impacto (de 0 a 2.10 metros)

Para a modelação da variação das deflexões devido à temperatura, os defletogramas obtidos com o programa JPav foram transformados em rácio da deflexão (DR), ou seja, a relação entre a deflexão à temperatura de referência, neste caso considerada igual a 30 °C, e a deflexão à temperatura do ensaio, como representado na Equação 4.9.

$$DR = \frac{\text{Deflexão à temperatura de referência}}{\text{Deflexão à temperatura do ensaio}} \quad (4.9)$$

Com os valores de DR é possível analisar a sua evolução como as indicadas na Figura 4.16, Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19 correspondentes aos defletogramas apresentados respetivamente na Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.13 e Figura 4.15.

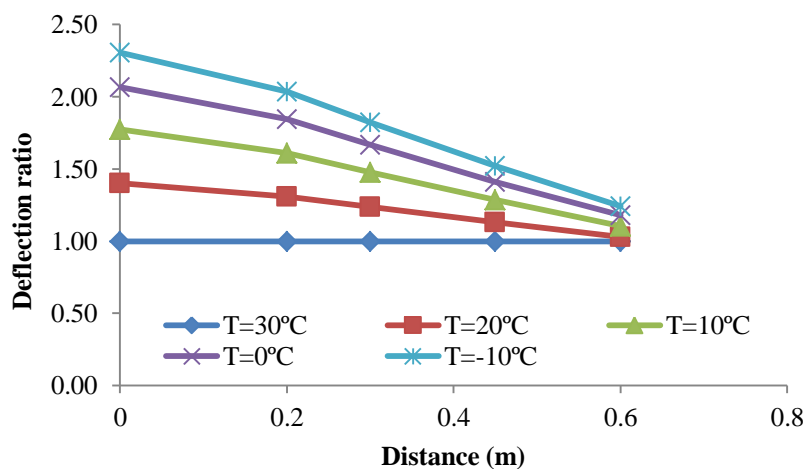


Figura 4.16 – Rácio da deflexão para pavimento com 0.1m de espessura betuminosa e fundação com 20 MPa

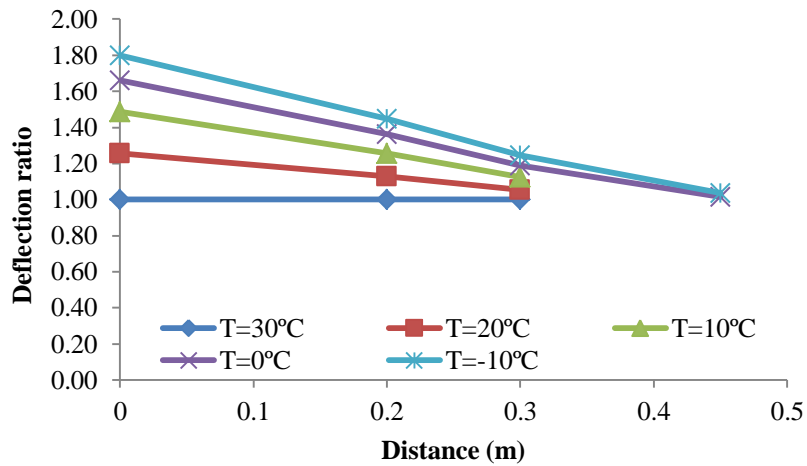


Figura 4.17 – Rácio da deflexão para pavimento com 0.1m de espessura betuminosa e fundação com 120 MPa

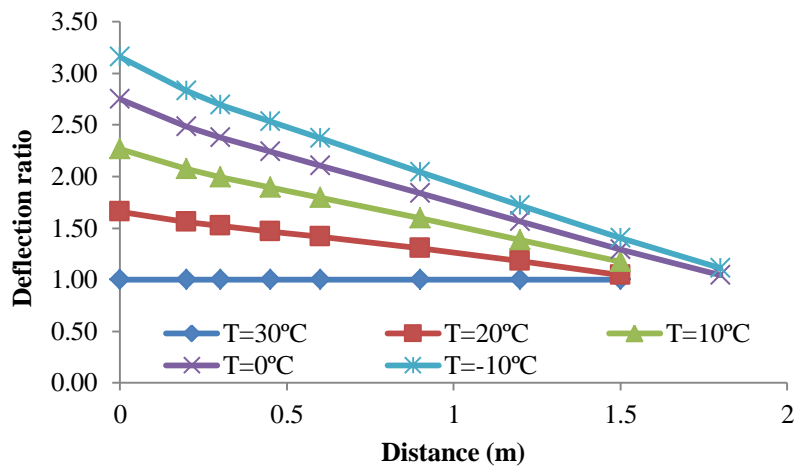


Figura 4.18 – Rácio da deflexão para pavimento com 0.4m de espessura betuminosa e fundação com 20 MPa

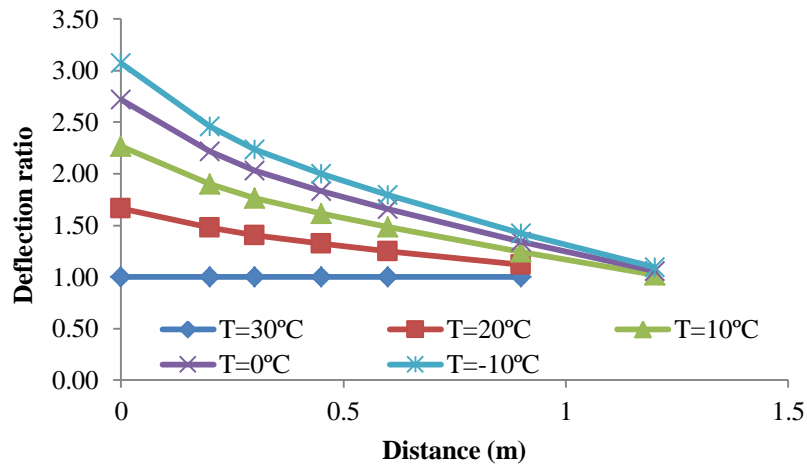


Figura 4.19 – Rácio da deflexão para pavimento com 0.4m de espessura betuminosa e fundação com 120 MPa

No que respeita à modelação dos pavimentos é de salientar que as variáveis incluídas na modelação são as que mais influenciam a deflexão de um pavimento flexível. Considera-se a espessura da camada betuminosa (h), o módulo de rigidez da fundação (E), a temperatura a meio da camada betuminosa (T) e a distância ao ponto de aplicação da carga (d).

O primeiro passo para a modelação, depois do cálculo do rácio da deflexão, é o estudo da forma como este rácio se comporta quando relacionado com cada uma das variáveis independentes. A primeira análise efetuada diz respeito ao comportamento com a espessura da camada betuminosa, para cada combinação de módulo de rigidez e temperatura. Apresenta-se de seguida esta análise para as distâncias de 0, 0.20, 0.30 e 0.45 metros, para um pavimento com fundação com 20 MPa e 20 °C de temperatura da mistura betuminosa (Figura 4.20 para a 1ª distância ($d_1=0m$) e para a 2ª distância ($d_2=0.20m$) e Figura 4.21 para a 3ª distância ($d_3=0.30m$) e para a 4ª distância ($d_4=0.45m$)).

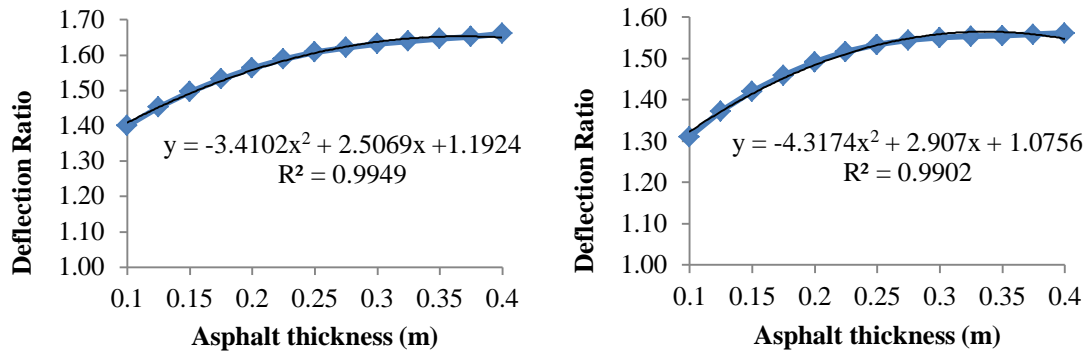


Figura 4.20 – DR em função de h para E=20 MPa e T=20°C para d1 e d2

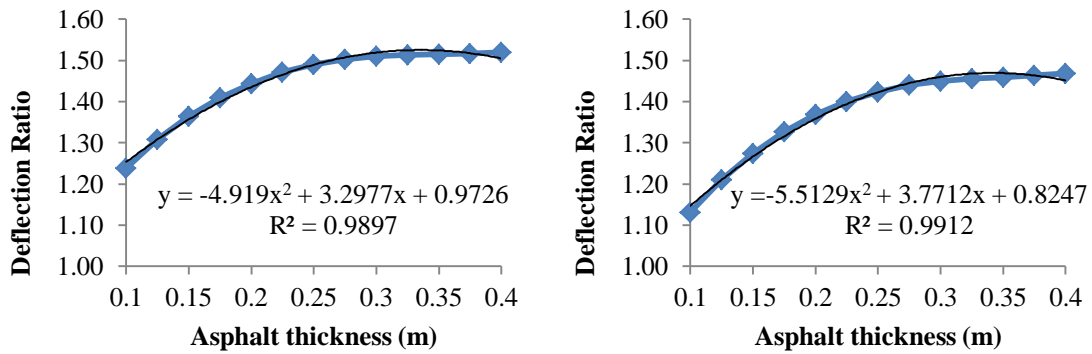


Figura 4.21 – DR em função de h para E=20 MPa e T=20°C para d3 e d4

Como se pode observar nas Figura 4.20 e Figura 4.21 o rácio da deflexão varia de forma polinomial com a espessura da camada betuminosa, verificando-se que uma equação do 2º grau se adapta com um R^2 elevado. Observa-se, ainda, a redução do DR com o aumento da distância, não havendo no entanto alterações significativas no comportamento da função. Salienta-se que o comportamento das variáveis com módulo da fundação diferente de 20 MPa é semelhante.

Pode ainda ser feita a análise do comportamento do rácio da deflexão com o módulo de rigidez da fundação (Figura 4.22 e Figura 4.23), para as distâncias d1 a d4.

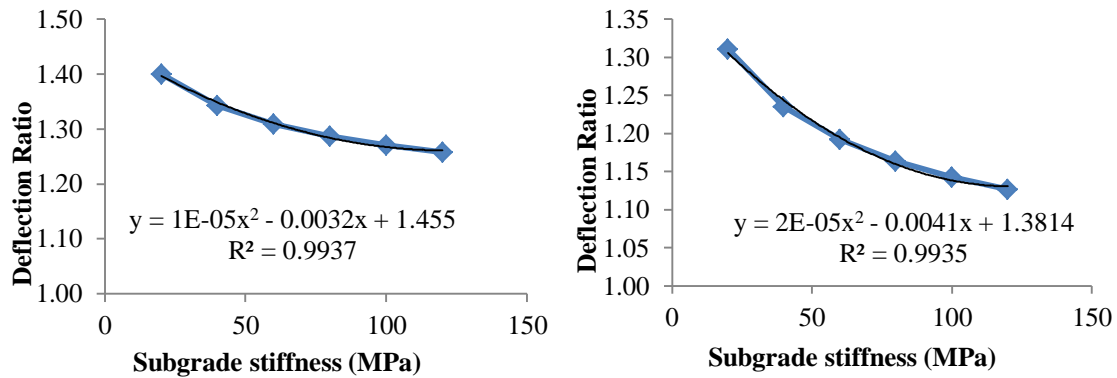


Figura 4.22 – DR em função de E para $h=0.10$ m e $T=20^\circ\text{C}$ para d1 e d2

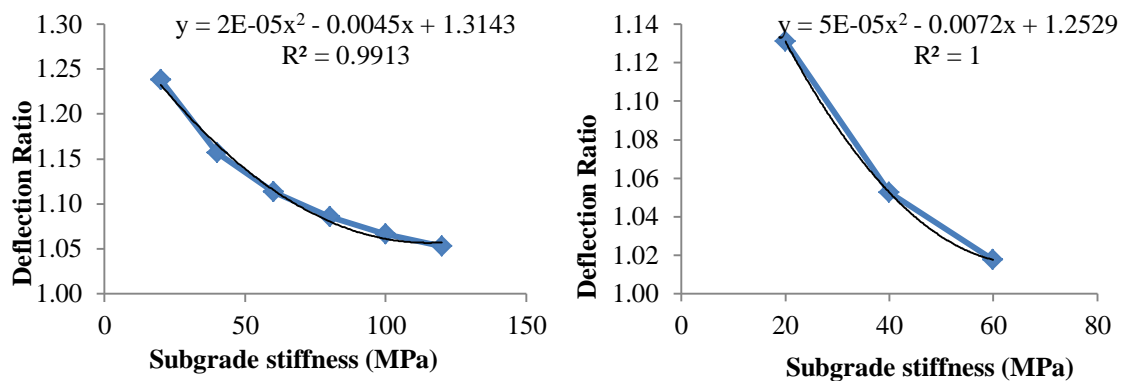


Figura 4.23 – DR em função de E para $h=0.10$ m e $T=20^\circ\text{C}$ para d3 e d4

Da mesma forma que com a espessura da camada betuminosa, o comportamento do rácio da deflexão com o módulo de rigidez do solo de fundação pode ser representado por uma linha de tendência polinomial de grau 2. Nas Figura 4.22 e Figura 4.23 é possível verificar que apesar do aumento da distância ao ponto de aplicação da carga, o comportamento do DR não possui variações significativas.

De seguida é necessária a avaliação do comportamento do rácio da deflexão com a alteração da temperatura, para cada espessura da camada betuminosa, módulo de fundação e distância ao ponto de aplicação da carga. Apresenta-se esta relação para as distâncias entre 0, 0.20 m, 0.30 m e 0.45 m, na Figura 4.24 e na Figura 4.25.

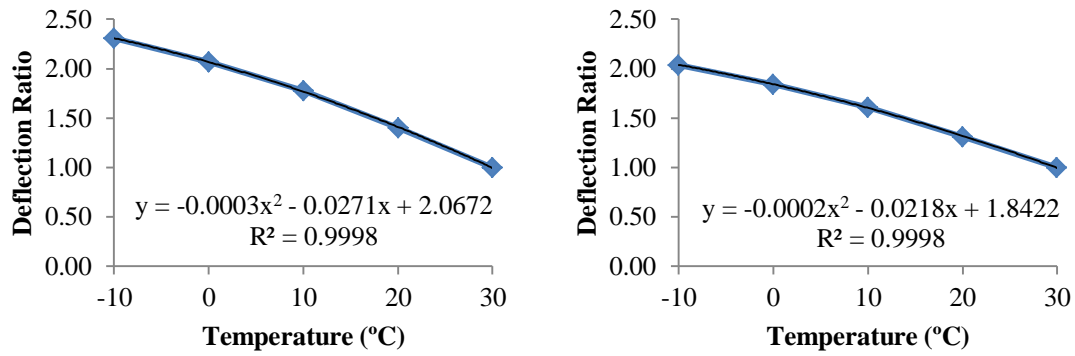


Figura 4.24 – DR em função de T para $h=0.10$ m e $E=20$ MPa para d1 e d2

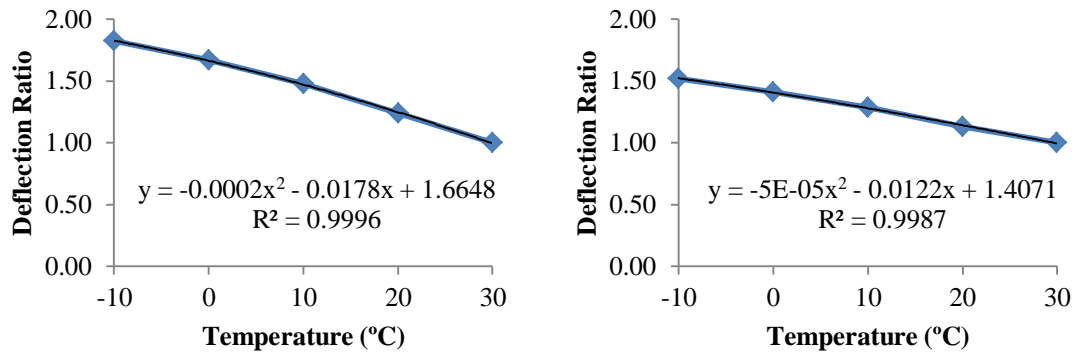
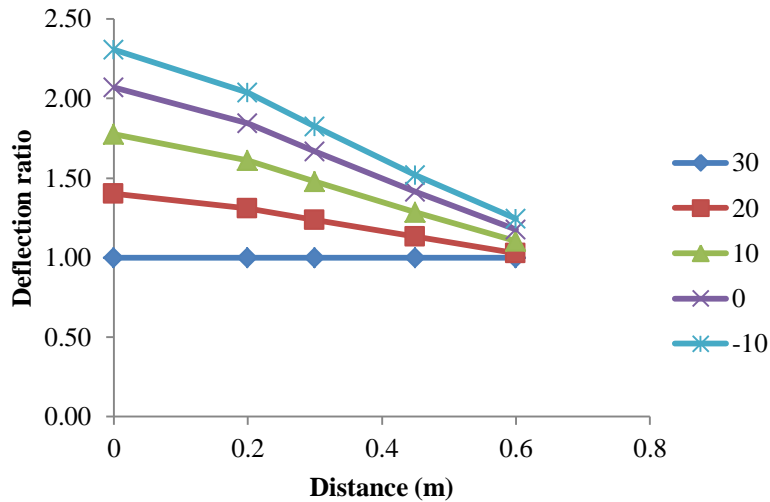


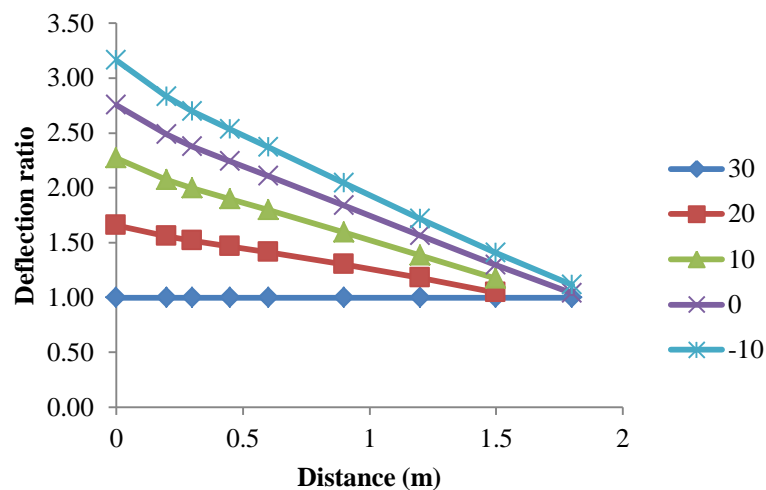
Figura 4.25 – DR em função de T para $h=0.10$ m e $E=20$ MPa para d3 e d4

As relações apresentadas nas Figura 4.24 e Figura 4.25 apontam que a relação entre o rácio da deflexão e a temperatura descreve-se por uma função polinomial do 2º grau, com um erro R^2 elevado, como as anteriormente ilustradas. Verifica-se que o comportamento se mantém com a alteração da distância (alterando-se, no entanto, a função que o caracteriza) e que o DR reduz-se à medida que a distância aumenta, ou seja, menor é a diferença entre a deflexão à temperatura de referência (30°C neste estudo) e a temperatura do pavimento aquando do ensaio.

Por fim, a relação que ainda não foi analisada, entre comportamento do rácio da deflexão e a variação da distância, representada na Figura 4.26 e na Figura 4.27. Esta análise é feita para todas as combinações de espessura da camada betuminosa, módulo da fundação e temperatura do ensaio.

Figura 4.26 – DR em função da distância para $h=0.10$ m e $E=20$ MPa

Nesta representação não foram incluídas as distâncias acima dos 0.60 m, uma vez que correspondem a valores de DR abaixo de 1 que não são de interesse para o estudo. O comportamento destas curvas sofre algumas alterações com o aumento da espessura da camada betuminosa, nomeadamente no que respeita à sua concavidade. Esta alteração pode ser observada através da comparação da Figura 4.26 e Figura 4.27, cujo pavimento possui uma camada betuminosa com 0.40 m de espessura.

Figura 4.27 – DR em função da distância para $h=0.40$ m e $E=20$ MPa

Depois de efetuada a análise de comportamento do rácio da deflexão em função de todas as variáveis com maior influência na deflexão, é possível concluir partindo das Figura 4.20 a Figura 4.27 que o DR pode ser estimado com base em funções polinomiais, a partir de cada variável. Com esta informação é possível a determinação de um modelo de cálculo do rácio da deflexão, para cada módulo de rigidez e para cada distância do ponto de aplicação da carga. Os coeficientes do modelo foram estimados pelo método dos mínimos quadrados que consiste em determinar os parâmetros desconhecidos de forma a minimizar a soma dos quadrados dos desvios.

De seguida apresenta-se cada um dos modelos desenvolvidos, assim como o erro associado.

4.2.1 Modelo de correção para E=20 MPa

O modelo de cálculo do rácio da deflexão para correção das deflexões para uma temperatura de referência de 30°C, desenvolvido para um módulo de fundação de 20 MPa, variando a espessura da camada betuminosa (h) e a temperatura (T) resultou na Equação 4.10. Os coeficientes da expressão variam com a distância ao ponto de aplicação da carga (d), podendo ser consultados na Tabela 4.22.

$$DR = \prod_{i=1}^2 (\beta_0 \cdot X_i^2 + \beta_1 \cdot X_i + \beta_2) \quad (4.10)$$

Com $i \in \{1, 2\}$ em que X_1 corresponde à espessura da camada betuminosa (h), X_2 a temperatura da camada betuminosa aquando do ensaio (T). Na Tabela 4.22 podem ser observados os valores estimados para os coeficientes β_i ($i= 0, 1, 2$).

Tabela 4.22 – Coeficientes do modelo de correção para E= 20 MPa

Distância	X ₁			X ₂		
	β_0	β_1	β_2	β_0	β_1	β_2
d1	-3.67E-01	2.66E-01	8.70E-02	-3.84E-03	-2.93E-01	1.98E+01
d2	-4.66E-01	3.08E-01	7.97E-02	-3.37E-03	-2.60E-01	1.87E+01
d3	-5.10E-01	3.38E-01	7.11E-02	-3.28E-03	-2.44E-01	1.83E+01
d4	-5.88E-01	4.03E-01	5.59E-02	-2.97E-03	-2.15E-01	1.74E+01
d5	-7.83E-01	5.53E-01	4.23E-02	-2.52E-03	-1.62E-01	1.45E+01
d6	-2.19E-01	1.90E-01	1.24E-02	-4.03E-03	-3.04E-01	3.29E+01
d7	-3.36E-01	3.84E-01	-1.01E-02	-1.48E-03	-1.41E-01	1.72E+01

Na Figura 4.28 apresenta-se a relação entre o rácio da deflexão real, no eixo das abcissas, e o rácio da deflexão calculado pelo modelo dado no eixo das ordenadas, para o ponto de aplicação da carga (d1) e a 0.20 m deste ponto (d2). Não são apresentadas estas relações para as restantes distâncias uma vez que a margem de erro se encontra na mesma ordem de valores. Como se pode verificar, a discrepância de valores é reduzida, sendo muitos dos valores reais e estimados iguais.

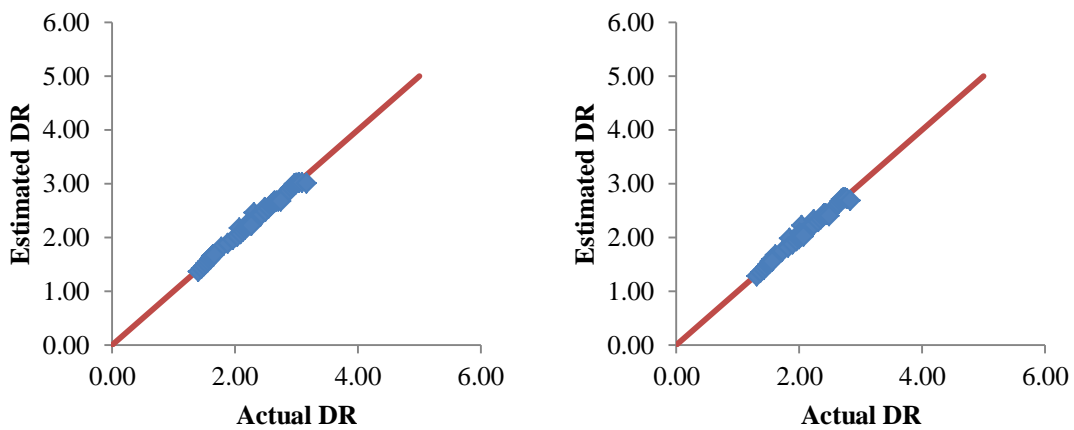


Figura 4.28 – Relação do DR real e dado pelo modelo para E=20 MPa e d1 e d2

4.2.2 Modelo de correção para E=40 MPa

A expressão de cálculo do DR para correção das deflexões apresenta-se na Equação 4.10, variando neste caso os coeficientes da expressão, expressos na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 – Coeficientes do modelo de correção para E= 40 MPa

Distância	X ₁			X ₂		
	β_0	β_1	β_2	β_0	β_1	β_2
d1	-3.87E-01	3.24E-01	7.71E-02	-3.60E-03	-2.75E-01	1.88E+01
d2	-7.11E-01	4.95E-01	6.25E-02	-2.97E-03	-2.15E-01	1.60E+01
d3	-6.00E-01	4.24E-01	5.00E-02	-3.15E-03	-2.27E-01	1.79E+01
d4	-6.08E-01	4.44E-01	3.63E-02	-2.85E-03	-2.05E-01	1.76E+01
d5	-3.85E-01	2.88E-01	1.05E-02	-4.26E-03	-3.05E-01	2.95E+01
d6	-2.85E-01	2.47E-01	4.41E-04	-3.12E-03	-2.36E-01	2.99E+01
d7	-5.43E-01	4.47E-01	-3.48E-02	-7.19E-04	-1.11E-01	2.17E+01

Na Figura 4.29 exibida de seguida verifica-se que o erro associado à expressão de cálculo apresentada é reduzido, tornando assim viável a sua utilização.

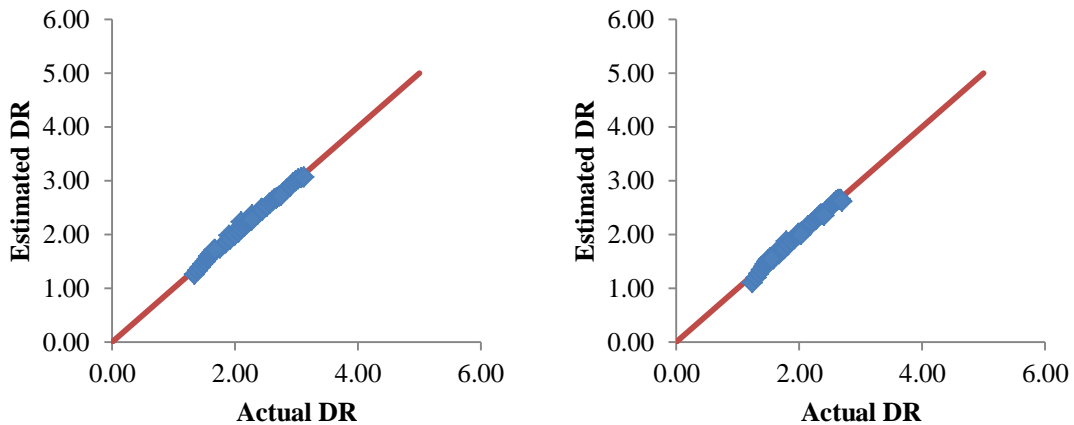


Figura 4.29 – Relação DR real e dado pelo modelo para E= 40 MPa e d1 e d2

4.2.3 Modelo de correção para E=60 MPa

Os coeficientes da Equação 4.10 que dizem respeito ao módulo da fundação de 60 MPa apresentam-se na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 – Coeficientes do modelo de correção para E= 60 MPa

Distância	X ₁			X ₂		
	β_0	β_1	β_2	β_0	β_1	β_2
d1	-3.83E-01	3.54E-01	7.00E-02	-3.33E-03	-2.65E-01	1.82E+01
d2	-4.86E-01	3.89E-01	6.48E-02	-2.81E-03	-2.14E-01	1.64E+01
d3	-6.98E-01	5.51E-01	7.03E-02	-1.96E-03	-1.50E-01	1.22E+01
d4	-5.60E-01	4.59E-01	4.43E-02	-2.04E-03	-1.61E-01	1.45E+01
d5	-3.11E-01	2.58E-01	1.10E-02	-3.76E-03	-2.82E-01	2.84E+01
d6	-3.32E-01	2.83E-01	-1.15E-03	-1.25E-03	-2.07E-01	2.53E+01
d7	-4.40E-01	4.04E-01	-2.66E-02	8.84E-04	-1.26E-01	1.85E+01

Na Figura 4.30 verifica-se que não há uma discrepância de valores significativa entre o DR real e estimado pelo modelo, comprovando-se viável a aplicação do modelo de cálculo.

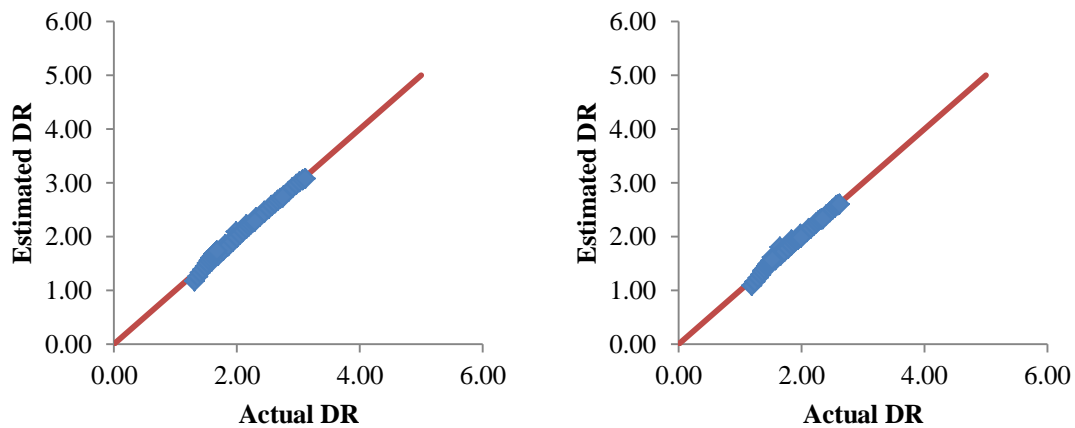


Figura 4.30 – Relação do DR real e dado pelo modelo para E=60 MPa e d1 e d2

4.2.4 Modelo de correção para E=80 MPa

Os coeficientes β_0 , β_1 e β_2 correspondentes a X_1 e X_2 da Equação 4.10 para o módulo de fundação 80 MPa expõem-se na Tabela 4.25.

Explicita-se, de seguida, na Tabela 4.25 a relação do DR real e dada pelo modelo, para as distâncias de aplicação de carga 0 e 0.20 m, podendo-se verificar a semelhança dos valores reais e dos valores obtidos através do modelo.

Tabela 4.25 – Coeficientes do modelo de correção para E= 80 MPa

Distância	X_1			X_2		
	β_0	β_1	β_2	β_0	β_1	β_2
d1	-2.27E-01	2.30E-01	4.37E-02	-4.99E-03	-3.95E-01	2.75E+01
d2	-5.12E-01	4.39E-01	6.99E-02	-2.23E-03	-1.80E-01	1.40E+01
d3	-3.12E-01	2.57E-01	2.89E-02	-3.81E-03	-3.10E-01	2.59E+01
d4	-6.20E-01	5.13E-01	3.12E-02	-1.79E-03	-1.48E-01	1.40E+01
d5	-2.90E-01	2.55E-01	1.13E-02	-3.08E-03	-2.45E-01	2.64E+01
d6	-1.14E-01	1.02E-01	4.60E-04	-7.09E-04	-4.87E-01	6.13E+01
d7	-4.06E-01	4.13E-01	-3.74E-02	-8.84E-04	-8.02E-02	1.82E+01

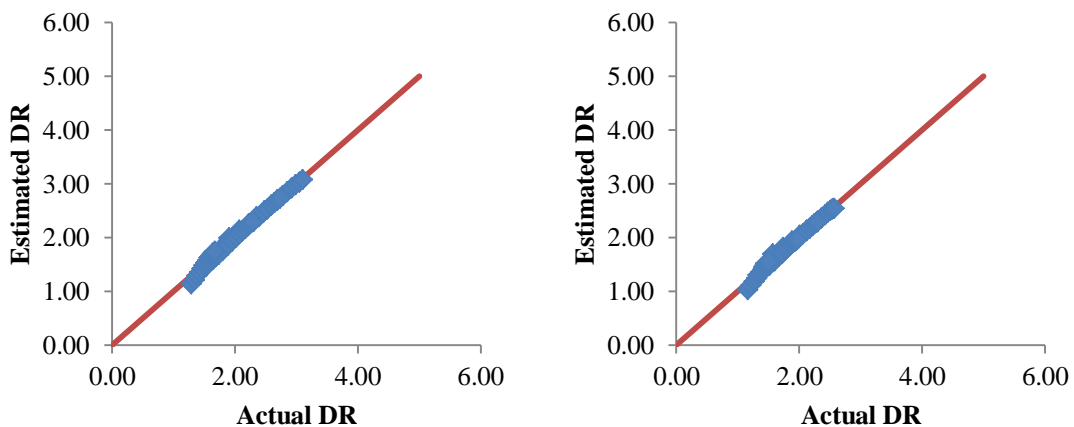


Figura 4.31 – Relação do DR real e dado pelo modelo para E=80 MPa e d1 e d2

4.2.5 Modelo de correção para E=100 MPa

Na Tabela 4.26 apresentam-se os coeficientes β da Equação 4.10 para o cálculo do rácio da deflexão para um pavimento com uma camada betuminosa e uma granular, com um módulo de fundação de 100 MPa. Recorda-se que a expressão de cálculo permite variar a espessura da camada betuminosa e a temperatura desta camada aquando do ensaio. Na Figura 4.32 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** apresentam-se as aproximações dos valores do DR real e calculados pelo modelo proposto.

Tabela 4.26 – Coeficientes do modelo de correção para E= 100 MPa

Distância	X ₁			X ₂		
	β_0	β_1	β_2	β_0	β_1	β_2
d1	-1.97E-01	2.23E-01	4.40E-02	-4.88E-03	-3.79E-01	2.68E+01
d2	-4.56E-01	4.17E-01	6.85E-02	-2.16E-03	-1.72E-01	1.38E+01
d3	-5.05E-01	4.38E-01	5.03E-02	-2.03E-03	-1.63E-01	1.43E+01
d4	-2.60E-01	2.29E-01	1.88E-02	-3.85E-03	-2.56E-01	2.72E+01
d5	-2.36E-01	2.10E-01	8.53E-03	-3.35E-03	-2.66E-01	3.08E+01
d6	-8.72E-02	8.05E-02	-8.67E-04	-4.58E-03	-4.72E-01	7.85E+01
d7	-4.73E-01	4.45E-01	-4.51E-02	-3.80E-04	-9.10E-02	1.91E+01

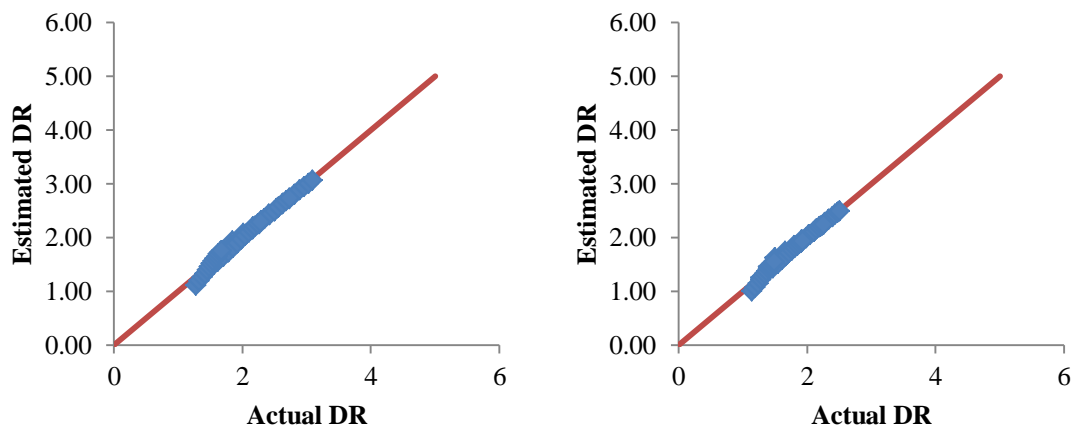


Figura 4.32 – Relação do DR real e dado pelo modelo para E=100 MPa e d1 e d2

Como se pode observar, assim como nos modelos apresentados anteriormente este possui também um erro associado reduzido, viabilizando a utilização da expressão proposta.

4.2.6 Modelo de correção para E=120 MPa

Na Tabela 4.27 apresentam-se os coeficientes da Equação 4.10 e o erro associado do último modelo desenvolvido (Figura 4.33), para um módulo de rigidez da fundação igual a 120 MPa.

Tabela 4.27 – Coeficientes do modelo de correção para E= 120 MPa

Distância	X ₁			X ₂		
	β_0	β_1	β_2	β_0	β_1	β_2
d1	-1.87E-01	2.20E-01	4.21E-02	-4.99E-03	-3.74E-01	2.70E+01
d2	-2.38E-01	2.25E-01	3.61E-02	-3.85E-03	-3.01E-01	2.50E+01
d3	-2.46E-01	2.22E-01	2.80E-02	-3.54E-03	-2.85E-01	2.59E+01
d4	-1.87E-01	1.70E-01	1.41E-02	-4.14E-03	-3.35E-01	3.48E+01
d5	-2.40E-01	2.29E-01	1.50E-02	-2.16E-03	-1.96E-01	2.39E+01
d6	-2.85E-01	2.76E-01	1.92E-03	2.66E-05	-1.41E-01	1.99E+01
d7	-6.29E+00	5.02E+00	2.00E-01	-2.00E-04	-1.50E-03	8.80E-01

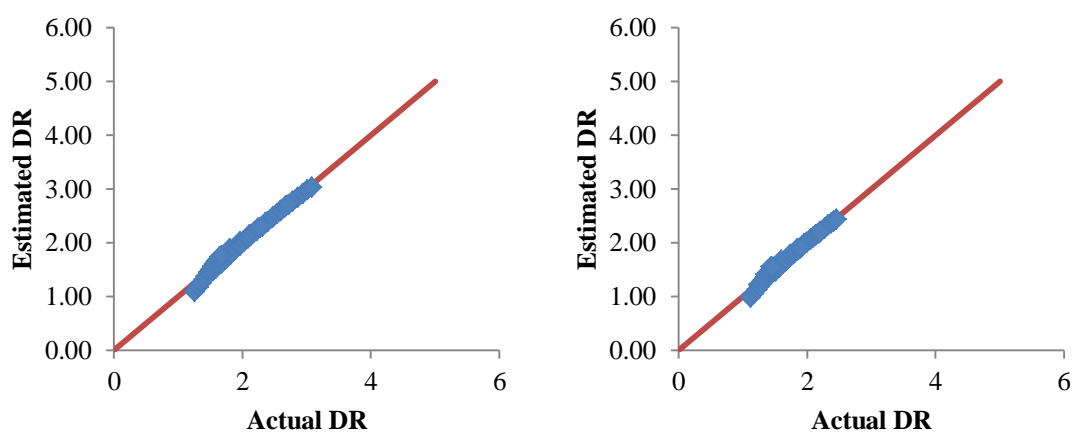


Figura 4.33 – Relação do DR real e dado pelo modelo para E=120 MPa e d1 e d2

4.2.7 Modelo de correção das deflexões

O modelo de correção das deflexões deverá permitir transformar a deflexão a dada temperatura e em determinadas condições de ensaio, para a deflexão a uma temperatura de referência. Assim, o modelo apresentado de seguida permite a introdução das quatro variáveis estudadas: espessura da camada betuminosa (h), módulo de rigidez da fundação (E), temperatura a meio da camada betuminosa (T) e distância ao ponto de aplicação da carga (d). O modelo de cálculo tem a configuração da Equação 4.11.

$$DR = \prod_{i=1}^4 (\beta_0 \cdot X_i^2 + \beta_1 \cdot X_i + \beta_2). \quad (4.11)$$

Sendo DR a variável resposta ou dependente e X_i com $i \in \{1,2,3,4\}$, em que X_1 corresponde à espessura da camada betuminosa (h), X_2 o módulo da fundação (E), X_3 a temperatura da camada betuminosa aquando do ensaio (T) e X_4 a distância ao ponto de aplicação da carga (d), sendo estas as variáveis independentes ou explicativas.

Os coeficientes da Equação 4.11 foram determinados pelo método dos mínimos quadrados, com o objetivo de determinar os parâmetros β 's de forma a minimizar a soma dos quadrados dos desvios. A melhor aproximação às variáveis encontra-se explícita na Tabela 4.28. Note-se que cada conjunto de coeficientes β_i diz respeito a uma variável independente distinta.

Tabela 4.28 – Coeficientes do modelo de correção da deflexão

X	β_0	<i>p-value</i>	β_1	<i>p-value</i>	β_2	<i>p-value</i>
X_1	9.53E-03	0.00	-8.55E-03	0.00	-1.66E-03	0.00
X_2	3.97E-03	0.00	-1.17E+00	0.00	3.66E+02	0.00
X_3	3.40E-03	0.00	2.72E-01	0.00	-2.32E+01	0.00
X_4	1.51E-02	0.00	-6.50E-02	0.00	1.05E-01	0.00

Segundo Spiegel (1984), ao tentar fixar decisões é conveniente a formulação de hipóteses ou conjeturas que podem ou não ser verdadeiras. Essas suposições denominam-se hipóteses estatísticas e em alguns casos são formuladas com o único intuito de serem rejeitadas ou invalidadas. Assim, sendo neste caso H_0 a hipótese de as parâmetros β_i serem nulos, o objetivo é rejeitar H_0 , ou seja

$$H_0 : \beta_i = 0$$

versus

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \quad (i = 0, 1, 2)$$

Quando se pretende testar uma hipótese estabelecida, a probabilidade máxima com a qual se sujeitará a correr o risco de cometer um erro é denominada nível de significância do teste α . Geralmente é adotado o valor de nível de significância de $\alpha = 0.05$ significando que, num teste de hipóteses, há cerca de 1 possibilidade, em 20, da hipótese ser rejeitada quando deveria ser aceite isto é, há uma confiança de 95%. Nestes casos diz-se que a hipótese é rejeitada no nível de significância $\alpha = 0.05$ (Spiegel, 1984).

No caso em estudo foi possível obter o *p-value* para cada coeficiente β determinado, funcionando este como uma medida da significância para a tomada de decisão nos testes de hipóteses. Através de um *software* foi possível concluir que para todas as variáveis o *p-value* é igual a 0, ou seja, nenhuma dos β é dispensável para o modelo de cálculo.

Nas Figura 4.34 e Figura 4.35 representa-se a relação obtida entre o rácio da deflexão real (eixo das abcissas) e o rácio estimado pelo modelo apresentado (eixo das ordenadas). Note-se que, tal como anteriormente, cada relação apresentada diz respeito a uma distância do ponto de aplicação da carga correspondendo d1 a 0 m, d2 a 0.20 m, d3 a 0.30 m e d4 a 0.45 m. Através da observação destas relações verifica-se que a diferença entre os valores reais e do modelo não é significativa. Note-se que as representações apenas consideram as distâncias d1 a d4, uma vez que para as restantes distâncias o erro não é muito distinto.

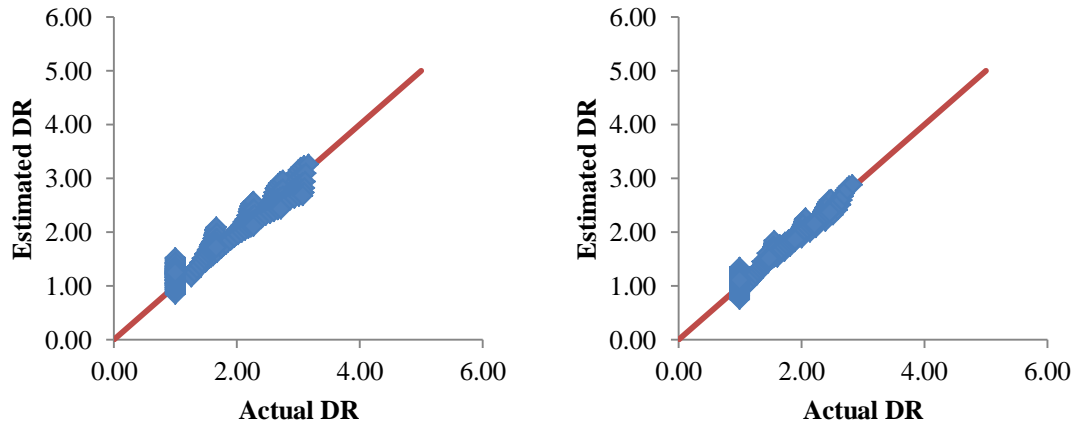


Figura 4.34 – Relação do DR real e calculado pelo modelo proposto para d1 e d2

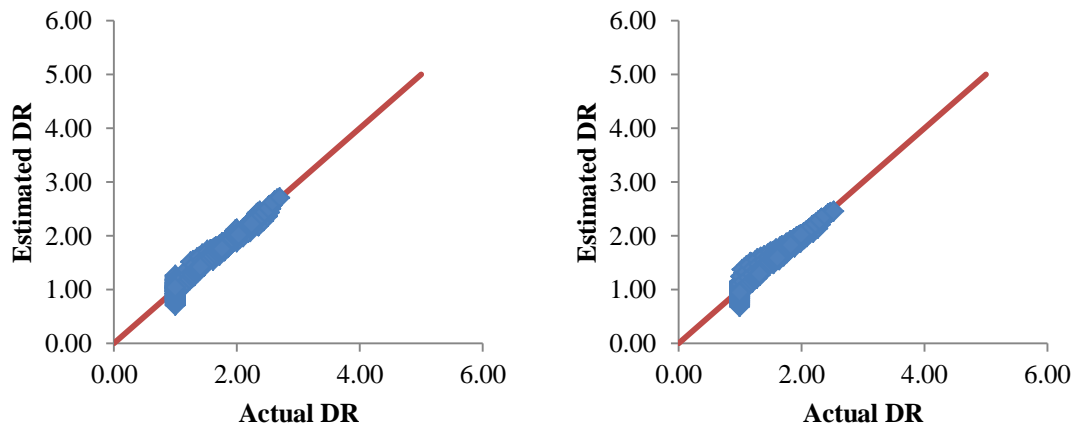


Figura 4.35 – Relação do DR real e calculado pelo modelo proposto para d3 e d4

Depois de definido o modelo de cálculo é necessário efetuar a análise dos resíduos do modelo desenvolvido, assim como a adequação dos dados utilizados para o seu desenvolvimento.

A avaliação da qualidade do modelo pode ser feita de entre outras formas, pela análise do coeficiente de determinação R^2 e pela raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSEA).

O R^2 permite quantificar a percentagem da variação total da variável resposta que é explicada pelo modelo desenvolvido. R^2 toma valores entre 0 e 1, sendo que 1 diz respeito ao caso em que os valores reais coincidem com os valores dados pelo modelo e 0 corresponde ao caso em que a variável resposta não é explicada pelas variáveis

independentes do modelo. No estudo desenvolvido o valor do R^2 foi obtido através de um *software* de análise estatística, tendo sido obtido o valor $R^2 = 0.968$. Assim, é possível concluir que 96.8 % dos valores de DR estimados pelo modelo são explicados pelas variáveis independentes espessura da camada betuminosa (h), módulo de rigidez da fundação (E), temperatura (T) e distância ao ponto de aplicação da carga (d).

Relativamente ao RMSEA, deve ser o mais próximo possível de 0 e representa a raiz quadrada da variação, em média, entre o quadrado dos valores de DR reais e os esperados/estimados. Assim, quanto mais próximo este valor estiver de 0 mais adequado é o modelo. O cálculo deste erro é dado pela Equação 4.12.

$$RMSEA = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}}. \quad (4.12)$$

em que:

y_i – variável resposta real;

\hat{y}_i – variável resposta estimada pelo modelo;

n – tamanho da amostra.

No caso deste trabalho, a variável resposta corresponde ao rácio da deflexão (DR). Relativamente ao número de dados, foram usados no desenvolvimento do modelo um total de $n = 2271$. O valor obtido para o RMSEA com o modelo em análise foi de 0.128 o que significa que, em média, o desfasamento entre os dados estimados pelo modelo e os dados reais (modelados pelo *software* JPav2.1) foi de 0.128.

Para o modelo de correção das deflexões desenvolvido é importante a avaliação do RMSEA em função da distância de aplicação da carga, apresentando-se na Figura 4.36 os resultados deste estudo.

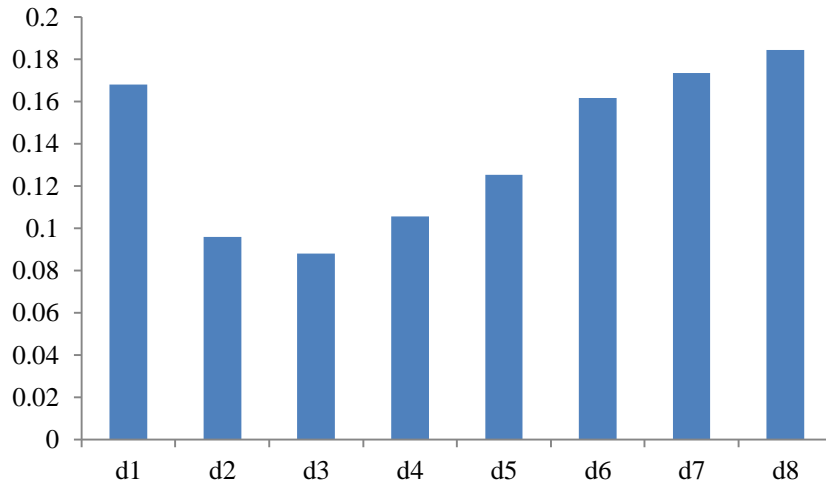


Figura 4.36 – RMSEA do DR para cada distância de aplicação da carga

Os resultados apresentados na Figura 4.36 foram conseguidos através da aplicação da Equação 4.11, sendo possível verificar que a distância d8 (a 1.50 m do ponto de aplicação da carga) possui um valor de RMSEA mais elevado, seguindo-se o ponto d7. A melhor aproximação dos dados é conseguida para a distância d3 (a 0.30 m do ponto de aplicação da carga) com um RMSEA de 0.088. Este resultado expressa que o desfasamento, em média, entre os valores reais e estimados pelo modelo para a distância d3 é de 0.088.

A análise da variância é também uma das formas frequentemente utilizadas para demonstrar a qualidade e significância do modelo, como se pode ver na Tabela 4.29.

Tabela 4.29 – Tabela ANOVA correspondente ao modelo não linear desenvolvido

	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F	<i>p-value</i>
Regressão	6003.117	12.00	500.2598	30779.46	0.00
Resíduos	36.683	2257.00	0.0163		
Total	6039.800	2269.00			

$$H_0 : \beta_0 = \beta_1 = \beta_2 = 0$$

versus

$$H_1 : \exists i \in \{0,1,2\}; \beta_i \neq 0$$

A observação da Tabela 4.29 permite verificar que o *p-value* é inferior a 0.05, o nível de significância geralmente admitido. Da tabela ANOVA conclui-se então que o modelo é adequado para modelar os dados, rejeitando H_0 .

4.3 Avaliação da capacidade de carga

O presente subcapítulo embora dizendo respeito à avaliação feita *in situ*, encontra-se dividido em duas partes: a primeira parte contempla os resultados dos ensaios realizados com defletómetro de impacto em que são apresentadas as deflexões obtidas em cada secção de ensaio e os respetivos defletogramas. Na segunda parte são utilizadas as deflexões obtidas para o processo de análise inversa com o objetivo de obter os módulos de rigidez de cada camada do pavimento e assim possibilitar a validação do modelo de correção das deflexões desenvolvido.

4.3.1 Resultados dos ensaios com defletómetro de impacto

Para a análise da deflexão obtida num determinado pavimento é importante ter em atenção, além da temperatura da camada betuminosa e do ambiente envolvente, determinadas características do trecho em estudo. No que respeita a degradações no pavimento foi possível verificar que as secções 1 e 2 não apresentam degradações significativas, ao contrário do pavimento da secção 3 que se encontra muito fendilhado e com alguns ninhos. Relativamente ao tipo de terreno em que o pavimento foi construído, a secção 1 encontra-se em escavação, as secções 2 e 3 em aterro.

Apresentam-se, de seguida, os resultados das deflexões obtidos em cada secção em estudo: a Tabela 4.30 relativa à secção 1, Tabela 4.31 relativa à secção 2 e Tabela 4.32 à secção 3. Note-se que os ensaios foram efetuados para duas alturas de queda, tendo sido efetuada uma extrapolação para a magnitude de 40 kN. Salienta-se, ainda, que quando atingida a temperatura de 30°C a meio da camada betuminosa os ensaios foram cessados, uma vez que se pretende a determinação do modelo corretivo com temperaturas até 30°C, e tendo em conta que a partir desta temperatura o pavimento poderá começar a ter um comportamento viscoso- elástico. A temperatura apresentada foi medida com termopares a meio da camada betuminosa.

Tabela 4.30 – Deflexões obtidas na secção 1

Hora	T (°C)	Distância (m)								
		0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
08:59	19	239	200	179	160	124	96	74	58	46
10:10	23	248	211	189	169	129	100	77	60	48
11:02	23.5	261	218	194	171	129	100	74	60	48
13:18	30	299	245	215	186	137	102	77	61	48
14:36	30	315	255	222	180	138	103	79	60	49

Tabela 4.31 – Deflexões obtidas na secção 2

Hora	T (°C)	Distância (m)								
		0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
09:19	19	129	103	92	80	58	41	30	24	18
10:21	22.5	136	109	94	81	58	41	30	22	19
11:12	23	143	113	99	84	60	42	31	22	17
13:38	29	178	130	111	92	62	43	30	23	18

Tabela 4.32 – Deflexões obtidas na secção 3

Hora	T (°C)	Distância (m)								
		0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
09:55	21	901	545	383	249	125	70	43	29	23
10:48	24	852	547	372	271	135	72	43	28	22
11:39	27	882	552	358	248	125	65	41	29	21

De forma a permitir uma melhor compreensão do comportamento das diferentes secções no que respeita à deflexão apresentam-se de seguida os defletogramas de cada uma.

Na Figura 4.37 é possível observar os defletogramas obtidos na secção 1. Como referido anteriormente, o pavimento desta secção encontra-se em bom estado de conservação não sendo visíveis quaisquer degradações. Assim, de acordo com esta característica seria esperada uma deflexão relativamente reduzida, o que se verifica.

Neste defletograma é possível confirmar que as deflexões alteraram-se ao longo do dia, e tendo em conta que todas as outras condições se mantêm (embora não se tenha fechado a estrada à passagem do tráfego), as variações na deflexão são devidas à temperatura. A alteração das deflexões com a temperatura evidencia que a camada betuminosa tem influência significativa no comportamento do pavimento.

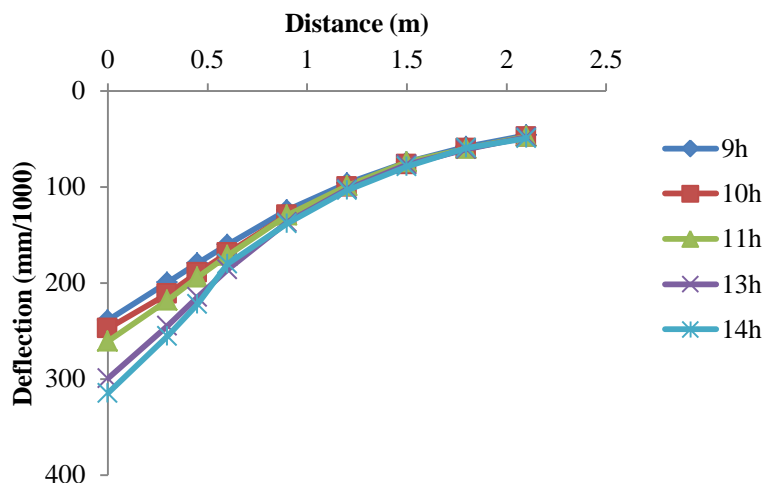


Figura 4.37 – Defletogramas medidos com defletómetro de impacto na secção 1

No ensaio efetuado nesta secção observa-se que a deflexão máxima ocorre no ponto de aplicação da carga, sendo que tem um valor mais reduzido no primeiro ensaio efetuado (às 9 horas), quando a temperatura é mais reduzida. O maior valor da deflexão verifica-se no último ensaio efetuado (às 14 horas). Pode ser visto, ainda, que este último ensaio à distância de 0.60 metros da aplicação da carga apresenta uma deflexão mais reduzida do que o ensaio anterior, evidenciando redução da influência por parte da temperatura na deflexão.

Na Figura 4.38 apresentam-se os defletogramas da secção 2. Verifica-se que nesta secção a variação da deflexão com a temperatura não foi tão significativa como na secção 1. No entanto admite-se que a camada betuminosa tenha influência significativa no comportamento do pavimento. É possível observar que a menor deflexão foi medida no ensaio efetuado às 9 horas e que às 13 horas a deflexão é consideravelmente mais elevada do que nos restantes ensaios, uma vez que a temperatura teve um acréscimo de aproximadamente 6°C em relação ao anterior.

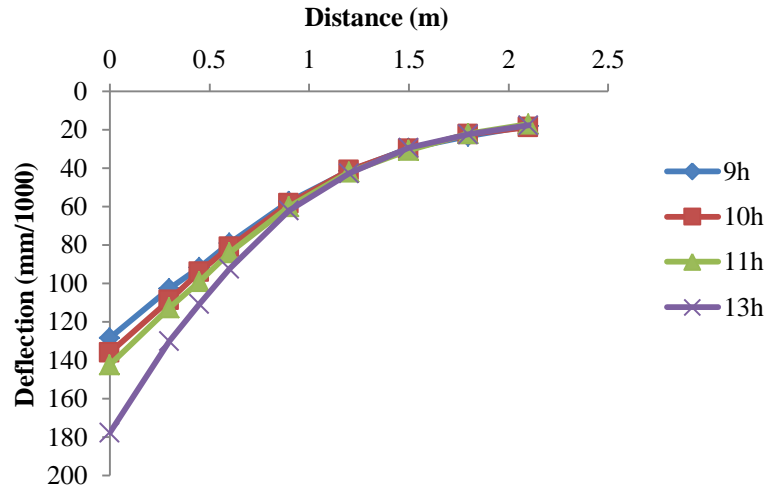


Figura 4.38 – Defletogramas medidos com defletómetro de impacto na secção 2

A Figura 4.39 representa os defletogramas obtidos na secção 3. Nesta representação é possível verificar que a deflexão no ponto de aplicação de carga tem um valor mais elevado do que nas restantes secções, sendo esta diferença devida não só ao tipo de pavimento mas também às degradações que nesta secção são em grande quantidade, principalmente fendas e ninhos ou peladas, embora estas últimas de menor dimensão e quantidade. Além destas razões, o facto de esta secção estar localizada num aterro poderá ser também um fator contribuinte para o aumento da deflexão. Relativamente às deflexões apresentadas, verifica-se que não há alterações significativas ao longo do dia. Associando isto à baixa distribuição de tensão, o defletograma comprova que o pavimento possui uma camada betuminosa com espessura reduzida.

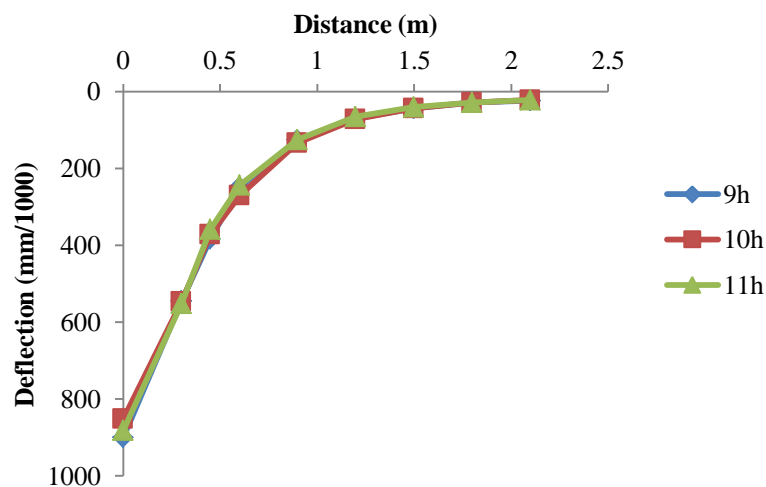


Figura 4.39 – Defletogramas medidos com defletómetro de impacto na secção 3

4.3.2 Análise inversa

O processo de análise inversa tem como objetivo a obtenção de um modelo estrutural do pavimento, determinando o módulo de rigidez de cada camada. Para isto, e utilizando um programa de cálculo automático sendo arbitrados os módulos de rigidez a partir dos quais é feita a primeira iteração. Tendo em consideração parâmetros como a espessura e o coeficiente de Poisson de cada camada, são calculadas as deflexões devidas às solicitações aplicadas no ensaio e comparadas com as medidas, estimando-se um novo conjunto de módulos. Caso os desvios obtidos entre as deflexões medidas e calculadas sejam superiores a determinado valor, o procedimento deverá ser repetido (Antunes, 1993) e (Freitas, 1999). Neste trabalho utilizou-se o programa de cálculo JPavBack2.6, sendo feita a análise para as 3 secções apresentadas anteriormente, para as várias temperaturas de ensaio. O primeiro passo para a definição da estrutura do pavimento é a introdução das características do ensaio no *software*, neste caso o raio da placa de 0.15 m e a magnitude da carga igual a 40 kN. Relativamente às características do pavimento, consideram-se com uma camada betuminosa e uma camada granular, adotando-se para a camada betuminosa um coeficiente de Poisson de 0.35, 0.40 para a camada granular, 0.45 para a fundação e 0.40 para a camada rígida abaixo da fundação. O passo seguinte é a introdução no programa das deflexões medidas e a aproximação dos defletogramas através da variação dos módulos de rigidez. Deve ser tido em conta que a alteração do módulo da camada betuminosa influencia a deflexão máxima e o defletograma até aproximadamente metade do seu comprimento, enquanto que a alteração do módulo de rigidez da fundação altera todo o defletograma. Contudo, salienta-se que a magnitude da influência de cada alteração dependerá sempre do tipo de pavimento a tratar, por exemplo num pavimento com camada betuminosa delgada, o módulo desta camada não terá grande influência no resultado final. No que respeita ao erro entre os defletogramas calculado e medido, este deverá ser o mínimo possível, preferencialmente inferior a 10 %. Este erro é calculado a partir da Equação 4.13,

$$RMS = \left(\sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2} \right) \times 100 \quad (4.13)$$

em que:

RMS – erro quadrático médio (%);

d_c – deflexão calculada (mm/1000);

d_m – deflexão medida com defletómetro de impacto (mm/1000).

A secção 1, como anteriormente referido, pertence à circular urbana da cidade de Guimarães, permitindo a ligação com a cidade de Fafe. O pavimento desta secção assim como o da secção 2 possui uma camada betuminosa relativamente espessa, com cerca de 0.20 m. A camada granular deste pavimento possui também 0.20 m de espessura e a fundação deverá possuir uma boa capacidade de carga. Nesta secção, a análise inversa foi feita para quatro temperaturas diferentes, respetivamente 19, 23, 23.5 e 30 °C, medidas a meio da camada betuminosa. Com o objetivo a obter a melhor aproximação possível das curvas da deflexão medida e calculada, optou-se pela alteração dos módulos de rigidez de forma que as curvas fossem paralelas, procedendo-se depois à sua sobreposição. Na Tabela 4.33 apresentam-se os resultados dos módulos de rigidez obtidos do estudo para a secção 1.

Tabela 4.33 – Módulos de rigidez obtidos por análise inversa: secção 1

Hora	Temperatura (°C)	E betuminosa (MPa)	E granular (MPa)	E fundação (MPa)
08:59	19	9000	320	90
10:10	23	8900	190	90
11:02	23.5	8100	160	90
13:18	30	6000	110	90
14:36	30	5500	100	90

Na Tabela 4.33 é possível observar que, como esperado, o módulo da camada betuminosa diminuiu ao longo do tempo, com o aumento da temperatura. Relativamente ao módulo da fundação, admite-se que 90 MPa é um módulo aceitável para este tipo de pavimento.

Na Tabela 4.34 apresentam-se os valores da deflexão medida e calculada em cada ensaio efetuado na secção 1, assim como o erro associado, obtidos através do *software*

JPavBack. Nesta tabela é possível observar que os erros são bastante reduzidos, ultrapassando os 10% somente na medição efetuada às 13.18 horas.

Tabela 4.34 – Deflexão medida e calculada (mm/1000) e erro (%) em cada ensaio na secção 1

Hora	Deflexão	Distância (m)								
		0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
08:59	Medida	239	200	179	160	124	96	74	58	46
	Calculada	338	201	179	158	121	93	72	55	44
	Erro (%)	-0.40	0.60	-0.30	-1.50	-2.20	-3.90	-3.00	-3.00	-2.40
10:10	Medida	248	211	189	168	129	100	77	60	48
	Calculada	250	211	187	164	124	94	71	55	43
	Erro (%)	0.80	-0.40	-1.40	-2.80	-4.10	-6.70	-5.70	-5.00	-4.80
11:02	Medida	261	218	194	171	129	99	74	60	48
	Calculada	261	218	193	168	126	94	71	54	43
	Erro (%)	0.10	0.00	-0.80	-2.00	-2.90	-4.90	-4.60	-9.20	-4.80
13:18	Medida	299	245	215	186	137	102	77	61	48
	Calculada	300	244	212	181	132	96	71	54	43
	Erro (%)	0.30	-0.10	-1.50	-2.70	-4.10	-6.70	-7.60	-10.30	-10.30
14:36	Medida	315	255	222	180	138	103	79	60	49
	Calculada	314	254	219	187	134	97	72	56	45
	Erro (%)	-0.20	-0.60	-1.60	3.60	-2.60	-5.80	-8.30	-6.90	-9.60

Na Figura 4.40 observa-se a aproximação dos defletogramas das deflexões medidas e calculadas pelo *software* no primeiro ensaio efetuado (às 08:59h). A sobreposição das curvas com um erro muito reduzido comprova que os resultados obtidos se adaptam.

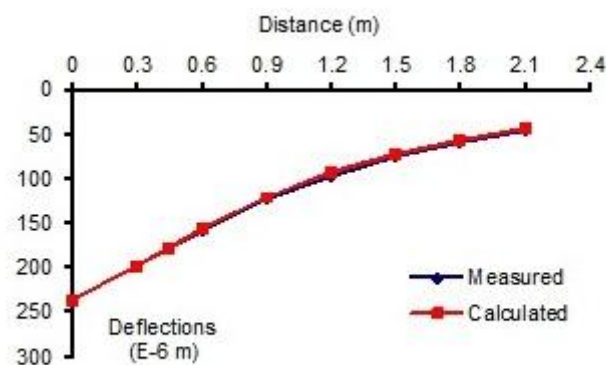


Figura 4.40 – Defletogramas medido e calculado: secção 1 (retirado do programa JPavBack 2.6.)

Relativamente à secção 2, e uma vez que tem umas características semelhantes à secção 1, introduz-se no *software* também uma espessura da camada betuminosa e granular igual a 0.20 m. Na Tabela 4.35 apresentam-se os dados obtidos no processo de análise inversa.

Tabela 4.35 – Módulos de rigidez obtidos por análise inversa: secção 2

Hora	Temperatura (°C)	E	E	E
		betuminosa (MPa)	granular (MPa)	fundação (MPa)
09:19	19	12650	520	90
10:21	22.5	11850	510	90
11:12	23	11150	495	90
13:38	29	6550	445	90

Na Tabela 4.35 verifica-se que os módulos de rigidez da camada betuminosa possuem valores relativamente elevados, uma vez que as deflexões medidas nesta secção são menores do que na secção 1, para as mesmas espessuras das camadas. Além disso, este tipo de estrada deverá possuir uma elevada capacidade estrutural. Na Tabela 4.36 apresentam-se as deflexões medidas e calculadas em cada ensaio assim como o erro associado.

A Tabela 4.36 permite observar que os erros ocorridos entre a deflexão medida e calculada são reduzidos em todos os ensaios, alcançando somente os 10.1% no ensaio efetuado às 10:21 horas.

Na Figura 4.41 apresentam-se os defletogramas medido e calculado com o *software* JPavBack para as deflexões medidas às 09:19 horas.

Tabela 4.36 – Deflexão medida e calculada (mm/1000) e erro (%) em cada ensaio na secção 2

Hora	Deflexão	Distância (m)								
		0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
09:19	Medida	128	103	92	79	58	41	30	24	18
	Calculada	130	105	90	77	54	38	27	21	17
	Erro (%)	1.2	1.9	-1.9	-3.3	-6.1	-8.5	-8.8	-12.8	-8.4
10:21	Medida	136	109	94	81	58	41	30	22	19
	Calculada	135	108	93	79	56	39	28	21	17
	Erro (%)	-0.9	-0.2	-1	-2.8	-4.8	-5.2	-7	-5.4	-10.1
11:12	Medida	143	113	99	84	60	42	31	22	17
	Calculada	141	113	97	82	58	40	29	22	18
	Erro (%)	-1.5	-0.3	-2.6	-1.8	-4.5	-4.1	-4.9	0	4.7
13:38	Medida	178	130	111	92	62	43	30	22	18
	Calculada	175	133	111	91	61	42	30	23	19
	Erro (%)	-1.5	2	-0.4	-1.2	-1.7	-2.4	0.3	0.8	5

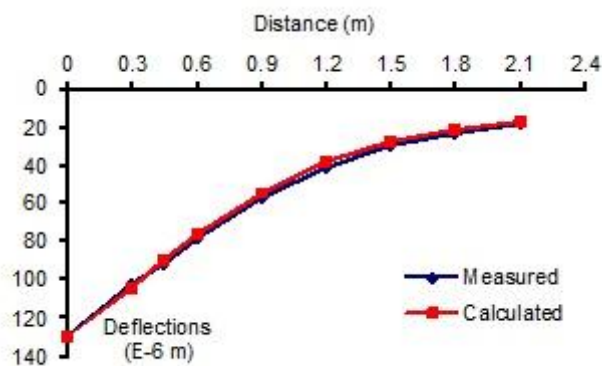


Figura 4.41 – Defletogramas medido e calculado: secção 2 (retirado do programa JPavBack 2.6.)

Como é possível observar na Figura 4.41, os defletogramas calculado e medido sobrepõem-se com um erro muito reduzido, provando a adaptação dos dados arbitrados ao pavimento em análise.

Relativamente à secção 3 foram feitos três ensaios até a temperatura do pavimento atingir os 30°C. Nesta secção em estudo o pavimento possui uma camada betuminosa de espessura reduzida (aproximadamente igual a 0.09 m) e uma fundação com um módulo consideravelmente elevado, como se verifica pelo defletograma apresentado na Figura 4.39, que representa uma reduzida variação da deflexão com a alteração da temperatura. Os resultados obtidos através do processo de análise inversa com estes dados e uma espessura da camada granular de 0.20 m encontram-se apresentados na Tabela 4.37.

Tabela 4.37 – Módulos de rigidez obtidos por análise inversa: secção 3

Hora	Temperatura (°C)	E betuminosa (MPa)	E granular (MPa)	E fundação (MPa)
09:55	21	2 400	80	70
10:48	24	3000	80	70
11:39	27	2400	80	70

Relativamente aos resultados obtidos salientam-se os módulos da camada betuminosa que possuem valores relativamente reduzidos, explicados pela elevada deflexão verificada e elevado número de degradações no pavimento.

Na Tabela 4.38 encontram-se explicitados os valores das deflexões medidas e calculadas assim como o erro associado em cada ensaio efetuado, apresentando-se os defletogramas correspondentes ao ensaio efetuado às 09.55h na Figura 4.42.

Da observação da Tabela 4.38 e da Figura 4.42 verifica-se que existe um erro associado entre a deflexão medida e calculada. O ajuste perfeito das curvas de deflexão medida e calculada é uma das principais dificuldades no processo de análise inversa. No caso desta secção há várias razões que permitem justificar o erro verificado, como o pavimento não ser um pavimento padronizado como da secção 1 e 2 e a dificuldade e desafio que se torna a análise inversa em pavimentos com camada betuminosa pouco

espessa, pois a bacia de deflexão é pouco sensível ao módulo desta camada (Oh et al., 2012).

Tabela 4.38 – Deflexão medida e calculada (mm/1000) e erro (%) em cada ensaio na secção 3

		Distância (m)								
Hora	Deflexão	0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
	Medida	901	545	383	249	125	70	43	29	23
09:55	Calculada	909	507	337	233	130	86	61	45	34
	Erro (%)	0.8	-7	-12.1	-6.4	4.3	22.8	40.8	53.6	44.8
	Medida	852	547	372	271	134	72	43	28	23
10:48	Calculada	858	500	340	237	132	86	61	45	34
	Erro (%)	0.7	-8.6	-8.8	-12.7	-1.7	19.7	42.3	60.3	51
	Medida	882	552	358	243	125	65	40	29	21
11:39	Calculada	909	507	337	233	131	86	61	45	34
	Erro (%)	3	-8.3	-5.9	-4	4	31	50.6	53.6	59.4

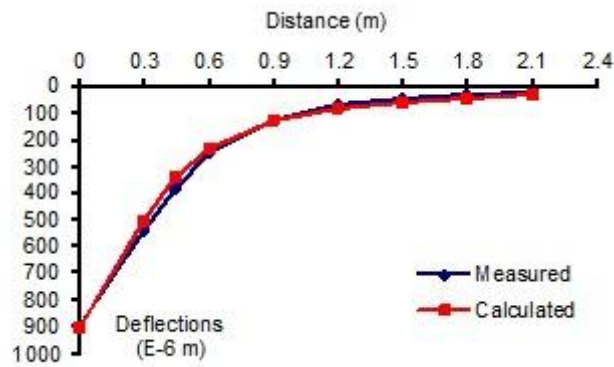


Figura 4.42 – Defletogramas medido e calculado: secção 3 (retirado do programa JPavBack 2.6.)

4.4 Aplicação do modelo às condições estudadas *in situ*

Nesta secção pretende-se fazer a verificação do modelo definido anteriormente para a correção das deflexões, com os pavimentos das 3 secções ensaiadas com o defletómetro de impacto. Para isso, procede-se cálculo do DR para cada secção recorrendo à Equação 4.11 e da deflexão a 30°C, dada pelo produto entre o DR e a deflexão à temperatura do ensaio. Com estes dados é possível a verificação do defletograma obtido para as deflexões corrigidas para 30°C. Note-se que as variáveis para o cálculo do rácio da deflexão são a espessura da camada betuminosa (h), módulo de rigidez da fundação (E), temperatura a meio da camada betuminosa (T) e distância ao ponto de aplicação da carga (d).

A secção 1 possui uma espessura da camada betuminosa $h = 0.20$ m e módulo de rigidez da fundação $E = 90$ MPa. Na Tabela 4.39 apresentam-se o rácio da deflexão (DR) calculado com estes parâmetros do pavimento e a Equação 4.11, e a deflexão calculada para a temperatura de 30°C, $D_{30°C}$. Note-se que a deflexão encontra-se expressa em micron.

Tabela 4.39 – DR calculado com a Equação 4.11 e deflexão a 30°C (mm/1000) para a secção 1

T°C	Hora		Distância (m)								
			0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
19	08:59	DR	1.52	1.24	1.12	1.01	0.83	0.69	0.59	0.54	0.54
		$D_{30°C}$	364	248	201	162	102	66	44	32	25
23	10:10	DR	1.36	1.11	1.00	0.91	0.74	0.61	0.53	0.49	0.48
		$D_{30°C}$	337	235	190	153	95	61	41	29	23
23.5	11:02	DR	1.34	1.10	0.99	0.89	0.73	0.60	0.52	0.48	0.48
		$D_{30°C}$	349	239	192	153	94	60	39	29	23
30	13:18	DR	1.05	0.86	0.78	0.70	0.57	0.47	0.41	0.38	0.37
		$D_{30°C}$	315	211	167	130	78	49	31	23	18
30	14:36	DR	1.05	0.86	0.78	0.70	0.57	0.47	0.41	0.38	0.38
		$D_{30°C}$	331	220	173	126	79	49	32	22	18

Com as deflexões calculadas para a temperatura de 30°C é possível realizar o defletograma correspondente, como pode ser observado na Figura 4.43.

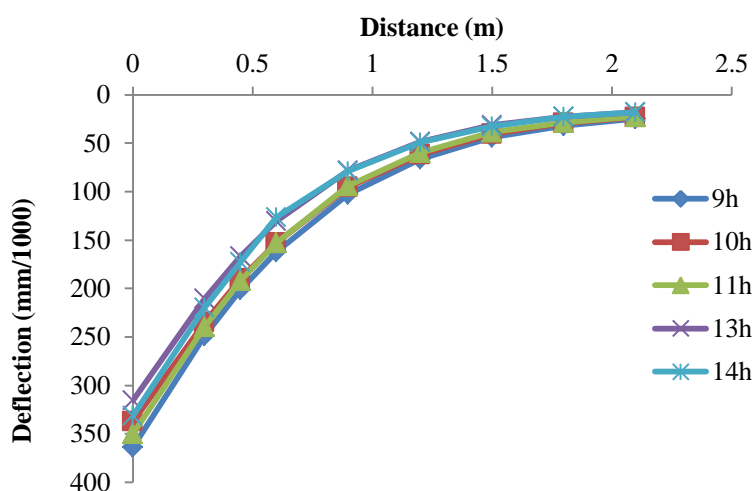


Figura 4.43 – Defletogramas corrigidos para T=30°C da secção 1

Como se pode verificar na Figura 4.43, na secção 1 a correção das deflexões para a temperatura de referência acarretou algum erro, uma vez que as curvas não estão todas sobrepostas. Tendo em conta que aquando da medição das deflexões às 13 e 14 horas a temperatura do pavimento estava a aproximadamente 30°C, o DR para estas medições deveria ser igual a 1.0, verificando-se, na Tabela 4.39 que toma o valor de 1.05. Um dos fatores que poderá justificar este erro é a descalibração do equipamento de medição da temperatura. Se na realidade a temperatura do pavimento for superior a 30°C o modelo não deverá funcionar, uma vez que só foi desenvolvido até esse limite. Além disto, deve ser tido em conta que a temperatura da camada betuminosa varia ao longo da mesma. No que respeita às restantes medições o erro é mais elevado principalmente no ponto de aplicação da carga, sendo este erro esperado devido às conclusões representadas na Figura 4.36.

A secção 2 apresenta, como referido anteriormente, características semelhantes à secção 1. Assim, para $h=0.20$ m e $E=90$ MPa, expõem-se na Tabela 4.40 os resultados da correção das deflexões.

Tabela 4.40 – DR calculado com a Equação 4.11 e deflexão a 30°C (mm/1000) para a secção 2

T°C	Hora		Distância (m)								
			0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
19	09:19	DR	1.52	1.24	1.12	1.01	0.82	0.69	0.59	0.54	0.54
		D _{30°C}	196	128	103	80	48	28	18	13	10
22.5	10:21	DR	1.38	1.13	1.02	0.92	0.75	0.62	0.54	0.49	0.49
		D _{30°C}	188	123	96	75	44	26	16	11	9
23	11:12	DR	1.36	1.11	1.00	0.91	0.74	0.61	0.53	0.49	0.48
		D _{30°C}	194	126	99	76	44	26	16	11	8
29	13:38	DR	1.10	0.9	0.81	0.73	0.60	0.5	0.43	0.39	0.39
		D _{30°C}	195	117	90	67	37	21	13	8.80	6.90

Na Tabela 4.40 apresentam-se os valores resultantes da aplicação da Equação 4.11 às características da secção 2 e a deflexão à temperatura de 30 °C (temperatura de referência), obtida pelo produto do DR e da deflexão medida em cada ensaio, presente na Tabela 4.31. Com os resultados obtidos da deflexão a 30°C foram construídos os defletogramas das deflexões corrigidas que podem ser vistos na Figura 4.44. Como se pode verificar, nesta secção o erro associado ao cálculo do rácio da deflexão é menor do que na secção 1. Verifica-se, no entanto, que na zona central do defletograma (distâncias correspondentes a d4 e d5) a aproximação acarreta um erro mais acrescido. Verifica-se que a curva correspondente ao ensaio efetuado às 13:38 horas encontra-se mais afastada das restantes curvas, devendo ser este afastamento devido à diferença entre as temperaturas do pavimento aquando do ensaio, como se poder verificar na Tabela 4.40.

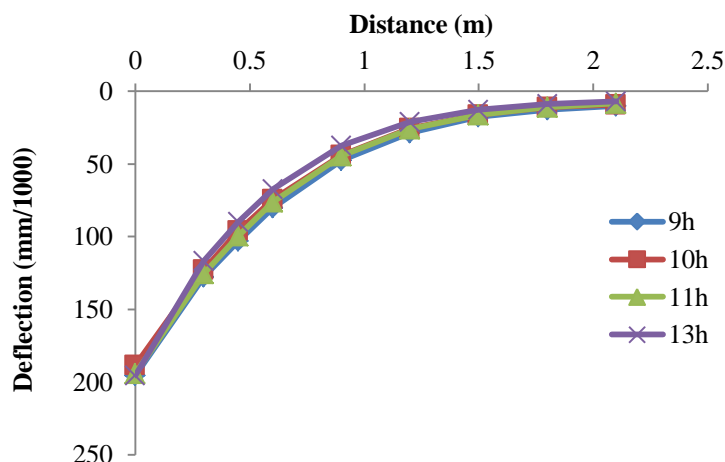


Figura 4.44 – Defletogramas corrigidos para $T=30^{\circ}\text{C}$ da secção 2

Na secção 3 não faz sentido a correção da deflexão para 30°C uma vez que devido à espessura reduzida da camada betuminosa entre outras características do pavimento, a deflexão não teve alterações significativas com a variação da temperatura. Assim, como se pode observar na Figura 4.39 as curvas das diferentes medições encontram-se já sobrepostas.

Este subcapítulo permitiu verificar a aplicação do modelo desenvolvido às condições estudadas *in situ*. Embora tenham sido obtidos alguns erros na sobreposição dos defletogramas, considera-se que as aproximações conseguidas são bastante aceitáveis uma vez que o modelo está definido para uma camada granular e uma camada betuminosa, constituições que na realidade dos pavimentos estudados deverão ser mais complexas. Além disto, salienta-se ainda alguns erros possíveis na medição da temperatura (termómetro descalibrado), o que alterará significativamente a deflexão final, uma vez que a temperatura é depois da distância a variável com mais influência no cálculo do rácio da deflexão.

4.5 Redes Neurais Artificiais

No contexto do presente trabalho, e uma vez que o objetivo é a previsão do rácio das deflexões de um pavimento utilizando as redes neuronais artificiais, interessa o conhecimento do comportamento e das operações que ocorrem nos neurónios da rede, já que neurónios são processadores de informação fundamentais para o seu funcionamento. Assim, serão de seguida apresentados as operações ocorridas assim como o desenvolvimento do modelo com as redes neuronais artificiais.

4.5.1 Considerações iniciais

Na Figura 4.45 são ilustrados os principais componentes e processos de um neurónio numa rede neuronal artificial.

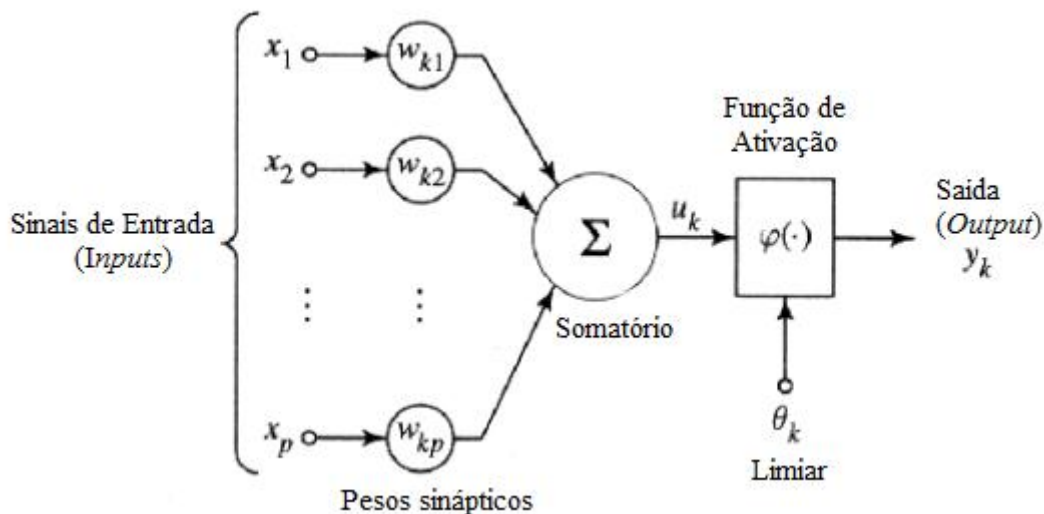


Figura 4.45 – Modelo de um neurónio (adaptado de (Haykin, 1994))

No modelo é possível identificar três elementos básicos (Haykin, 1994):

- Um conjunto de pesos sinápticos. Mais especificamente, verifica-se a presença de um sinal x_j no input j que quando conectado com o neurónio k é multiplicado pelo peso w_{kj} (note-se a forma como é escrita a notação do peso, em que o k se refere ao neurónio em questão e o j de onde provém).

- Somatório tem como função adicionar todos os *inputs* multiplicados pelos respetivos pesos.
- Função de ativação serve para limitar a amplitude do *output* devolvido pela rede, estando geralmente entre 0 e 1 ou -1 e 1.

Além destes elementos deve ainda ser referido o *bias* ou limiar, uma entrada adicional que pode ser acrescentada ao neurónio artificial e tem um valor de entrada +1, sendo que o seu peso é ajustável como os restantes (Loesch & Sari, 1996).

Assim, as operações ocorridas podem ser descritas segundo equações matemáticas. A Equação 4.14 define o peso relativo de cada *input* (note-se que o significado de cada variável presente na equação encontra-se explanado acima).

$$u_k = \sum_{j=1}^p w_{kj} \cdot x_j \quad (4.14)$$

Depois de obtido o parâmetro anterior e como se verifica na Figura 4.45, é necessária a consideração do parâmetro *bias* anteriormente especificado:

$$v_k = u_k - \theta_k \quad (4.15)$$

Por fim, é utilizada a função de ativação já definida como apresentado na Equação 4.16.

$$y_k = \varphi(v_k) \quad (4.16)$$

Segundo (Neto, 2004), não existem regras definidas para a escolha da função de ativação para o desenvolvimento de um modelo com a utilização das RNA. Assim, a função de ativação é escolhida por um processo de tentativa-erro, adotando-se aquela que fornecer o melhor desempenho. Uma das funções mais comuns neste tipo de trabalho é a função sigmoide definida na Equação 4.17.

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (4.17)$$

4.5.2 Modelo de previsão do rácio da deflexão

Para o desenvolvimento do modelo de previsão com redes neuronais artificiais utilizam-se os dados obtidos na fase de modelação numérica com o *software* JPav2.1 para obtenção do rácio da deflexão. Para o desenvolvimento de um modelo de previsão através das redes neuronais artificiais são necessários alguns procedimentos:

- O primeiro passo para a utilização das RNA é a preparação dos dados. Os dados a introduzir na rede devem estar organizados de forma aleatória, forçando-a assim a computar todas as gamas de valores. Além disto, nos programas que usam o algoritmo de *back-propagation* é necessário que os dados sejam normalizados entre 0 e 1, uma vez que as funções de ativação só fornecem valores nesse intervalo. Por fim, os dados devem ser divididos em valores de teste e valores de validação, sendo que os dados para a fase de teste deverão representar aproximadamente 85% do total e os dados de validação somente 15%.
- Devem ser definidos o número de neurónios de entrada e de saída. No caso em estudo a rede deverá ter quatro neurónios de entrada (*inputs*), correspondentes às variáveis utilizadas para o desenvolvimento do modelo do DR:
 - Espessura da camada betuminosa (h);
 - Módulo de rigidez do solo de fundação (E);
 - Temperatura da camada betuminosa (T);
 - Distância (d);

No que respeita aos neurónios ou nós de saída (*outputs*) neste caso a rede deverá ter somente um, o rácio da deflexão (DR).

- Definição da função de ativação que produza resultados mais satisfatórios assim como dos parâmetros *momentum* e taxa de aprendizagem.
- Depois de definida a função de ativação e o número de *inputs* e *outputs* deve ser selecionado um tipo de arquitetura (o número de camadas ocultas e número de neurónios de cada camada) e fazer o treinamento e validação dos dados da rede. De forma a seleccionar a arquitetura mais adequada ao caso em estudo deverão ser feitas várias iterações verificando o erro que a rede devolve, tendo em atenção o *over-fitting* ou seja quando a rede se adapta aos valores de treino, tendo nesta fase um erro decrescente e na fase de teste o contrário.

No caso em estudo utiliza-se o programa QNET2000 por ser de livre acesso e utilização simples. Este *software* tem a vantagem de permitir a escolha da arquitetura desejada para o treinamento da rede, sendo possível selecionar até oito camadas ocultas, permitir desativar ligações entre neurónios e selecionar a função de ativação desejada, sendo possível escolher entre a função sigmoide, gaussiana, tangente hiperbólica e secante hiperbólica. No que respeita à introdução dos dados, é permitido selecionar o número de dados a utilizar no processo de validação e a forma como são selecionados no conjunto de dados totais, sendo que neste caso se utilizaram 350 conjuntos de dados para validação (aproximadamente 15%) sendo selecionados de forma aleatória. Neste caso a normalização dos dados não foi feita uma vez que o programa efetua automaticamente, se assim for selecionado. A introdução dos parâmetros taxa de aprendizagem e *momentum* são importantes para a performance da rede uma vez que, como referido anteriormente, influenciam a velocidade de convergência da rede mas também a sua instabilidade. Assim, para todas as iterações efetuadas adotaram-se, para a taxa de aprendizagem o valor 0.01 e para o *momentum* 0.8.

No caso em estudo a função sigmoide é selecionada como função de ativação uma vez que proporcionou bons resultados com as arquiteturas treinadas. Foram estudadas três arquiteturas diferentes:

- Arquitetura 1: 4 neurónios de entrada (*inputs*), 3 neurónios na camada oculta e 1 neurónio na camada de saída (*output*) – arquitetura 4-3-1;
- Arquitetura 2: 4 neurónios de entrada (*inputs*), 3 neurónios na primeira camada oculta, 2 neurónios na segunda camada oculta e 1 neurónio na camada de saída (*output*) – arquitetura 4-3-2-1;
- Arquitetura 3: 4 neurónios de entrada (*inputs*), 6 neurónios na camada oculta e 1 neurónio na camada de saída (*output*) – arquitetura 4-6-1;

A avaliação da arquitetura que se adequa ao modelo de previsão pode ser feita recorrendo a dois parâmetros dados pelo *software* ao fim de cada conjunto de iterações, o erro máximo e o coeficiente de correlação. Na Figura 4.46 e Figura 4.47 apresenta-se a evolução do coeficiente de correlação com o número de iterações efetuadas, para as fases de treino e de teste de cada arquitetura.

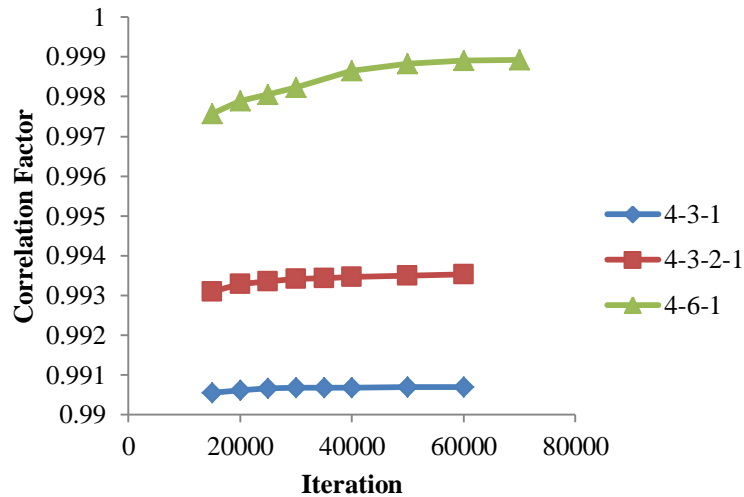


Figura 4.46 – Coeficiente de correlação das arquiteturas 1, 2 e 3 na fase de treino em função do número de iterações

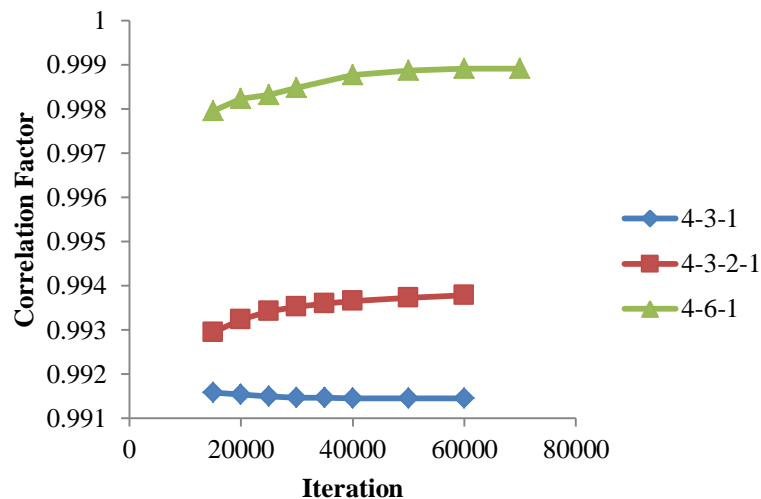


Figura 4.47 – Coeficiente de correlação arquiteturas 1, 2 e 3 na fase de teste em função do número de iterações

O coeficiente de correlação é uma medida da relação entre duas variáveis. Este coeficiente possui valores máximos de 1, sendo que 1 representa uma correlação perfeita. No caso das RNA o coeficiente de correlação relaciona os outputs alcançados e os introduzidos na rede (objetivo). Como pode ser observado, o coeficiente de correlação aumenta à medida que aumentam o número de iterações e é elevado para todas as arquiteturas estudadas, possuindo em todas as hipóteses valores acima dos 0.99.

Além disto, os valores na fase de treino e de teste/validação não possuem diferenças consideráveis, e em nenhum dos casos a rede entrou em processo de *over-fitting*, que podia ser observado pela diminuição do erro na fase de treino e o seu aumento na fase de teste.

Tendo em conta as considerações anteriores, considerando-se esta uma rede com arquitetura simples e possuindo o maior coeficiente de correlação, a arquitetura selecionada para previsão do DR é a 3, com 4 neurónios de entrada, 6 neurónios numa camada oculta e um neurónio na camada de saída (Figura 4.48). Optou-se por fazer a previsão com os dados obtidos depois de a rede fazer 70 000 iterações, uma vez que a partir desse número de iterações os valores do erro começam a estabilizar. O erro máximo desta configuração de rede depois de fazer 70 000 iterações é 0.13891 na fase de treino e 0.10404 na fase de teste/validação.

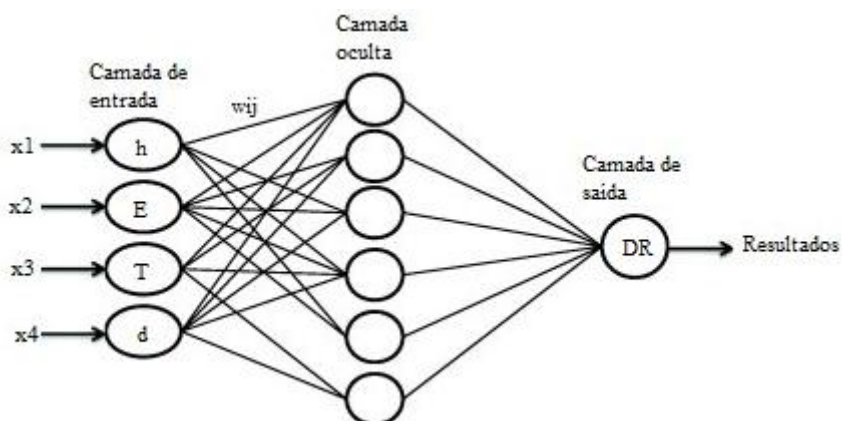


Figura 4.48 – Rede com arquitetura 4-6-1 (adaptada de (Sivapathasekaran et al., 2010))

Além dos valores dos valores do erro e coeficiente de correlação o programa utilizado fornece outros dados e representações que permitem ter uma melhor percepção da performance da rede.

Na Figura 4.49 é possível observar a comparação entre os dados obtidos pela rede e os *inputs* normalizados, fornecida pelo *software* de cálculo, para as 70 000 iterações.



Figura 4.49 – Relação entre os *outputs* introduzidos e os dados pela rede (adaptado do programa QNET2000)

Como é possível observar, o desempenho da rede é muito bom, uma vez que os dados introduzidos e os devolvidos pela rede estão muito próximos. É possível verificar ainda que, como referido anteriormente, o *software* efetua a normalização dos valores entre 0.15 e 0.85.

A Tabela 4.41 apresenta os pesos sinápticos e o *bias* ou limiar referentes a cada conexão entre neurónios das três camadas da rede. Com os valores fornecidos nesta tabela e as Equações 4.18 a 4.21 é possível a implementação do modelo de previsão do rácio da deflexão.

Por fim, é fornecido ainda pelo *software* o peso correspondente a cada variável de entrada (*input*) para a previsão do rácio da deflexão. Assim, os dados da Tabela 4.42 confirmam que a distância ao ponto de aplicação da carga (*d*) tem a maior influência no cálculo do rácio da deflexão, como anteriormente especificado. Verifica-se ainda que a variável com menor influência é o módulo de rigidez da fundação (*E*) seguido da espessura da camada betuminosa.

Tabela 4.41 – Pesos sinápticos (w) de cada conexão e $bias$ (θ) entre as camadas constituintes da rede

		Camada de entrada				Camada de saída	
		h	E	T	d	Bias	DR
Camada intermédia	1	-1.9796	-3.5826	-2.2832	2.65542	-0.461	3.93599
	2	-4.4523	-0.5288	-2.2767	5.13298	-1.2275	-5.28158
	3	-1.5607	0.80622	-5.1248	4.60402	4.91949	4.14741
	4	-2.3876	-0.416	1.84515	-1.5487	2.77435	2.05452
	5	2.36917	-0.7353	-3.3231	-5.0053	2.36242	2.33282
	6	2.88303	0.19711	-3.1924	-10.047	-1.9733	7.90713
	Bias						-7.57173

Tabela 4.42 – Contribuição (%) de cada $input$ para a previsão de DR

	h	E	T	d
Contribuição (%)	18.24	9.41	32.01	40.35

A análise da Tabela 4.42 permite verificar, como referido, que o módulo de rigidez da fundação (variável E) é a que possui uma menor contribuição para o valor do rácio da deflexão, contribuindo apenas em 9.41%. Esta análise permite concluir que no caso de ser pretendido um modelo com menor número de variáveis, logo mais simples, a opção mais viável é a exclusão do módulo de rigidez da fundação como variável independente do modelo de correção da deflexão.

4.6 Modelo de correção das deflexões excluindo o módulo de rigidez da fundação

Tendo em consideração as conclusões obtidas no estudo com Redes Neurais Artificiais, nesta fase do trabalho é desenvolvido um modelo de correção das deflexões, seguindo o mesmo procedimento apresentado no Capítulo 4.2 mas excluindo a variável independente módulo de rigidez da fundação (E).

A exclusão de uma das variáveis do modelo de correção arrecadará, à partida, um erro mais elevado associado ao DR calculado. No entanto, tendo em conta que o número de variáveis a utilizar é mais reduzido o modelo torna-se mais simples e, embora menos preciso, poderá ser mais vantajoso.

O modelo desenvolvido é da forma da Equação 4.18,

$$DR = \prod_{i=1}^4 (\beta_0 \cdot X_i^2 + \beta_1 \cdot X_i + \beta_2) \quad (4.18)$$

Em que DR é a variável resposta ou dependente e X_i com $i \in \{1,2,3\}$, em que X_1 corresponde à espessura da camada betuminosa (h), X_2 a temperatura da camada betuminosa aquando do ensaio (T) e X_3 a distância ao ponto de aplicação da carga (d), sendo estas as variáveis independentes ou explicativas. Na Tabela 4.43 apresentam-se os coeficientes β_i do modelo de correção desenvolvido.

Tabela 4.43 – Coeficientes do modelo de correção das deflexões excluindo E

X	β_0	β_1	β_2
X_1	4.83E-02	-4.51E-02	-9.39E-03
X_2	2.02E-02	1.91E+00	-1.57E+02
X_3	1.39E-01	-5.29E-01	8.49E-01

Na Figura 4.50 e na Figura 4.51 é possível observar a relação entre os valores de DR reais e estimados pelo modelo de correção das deflexões sem a consideração da variável independente módulo de rigidez da fundação, para as distâncias ao ponto de aplicação da carga d1 a d4, sendo d1 no ponto de aplicação da carga, d2 a 0.20 m, d3 a 0.30 m e d4 a 0.45. Como é possível observar, os valores de DR não apresentam diferenças muito consideráveis, sendo que em muitos dos casos o rácio da deflexão real e estimado pelo modelo são idênticos.

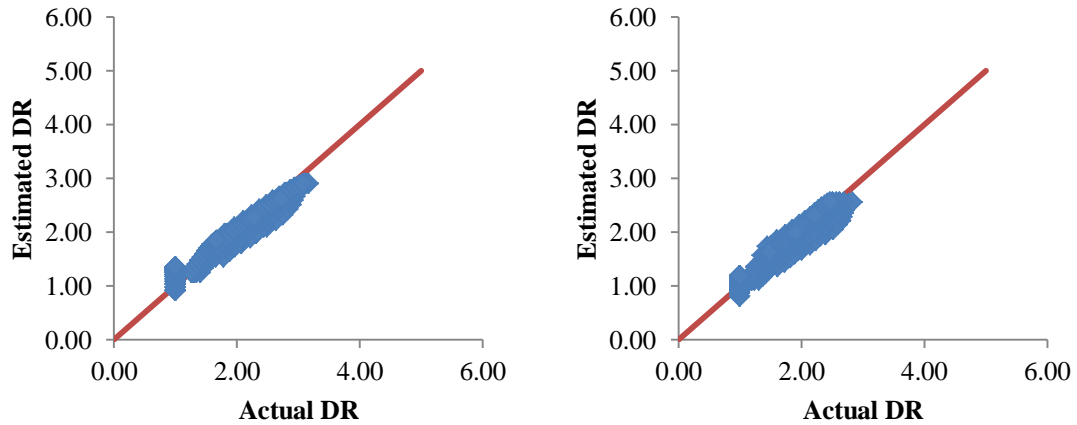


Figura 4.50 – Relação do DR real e calculado pelo modelo para d1 e d2

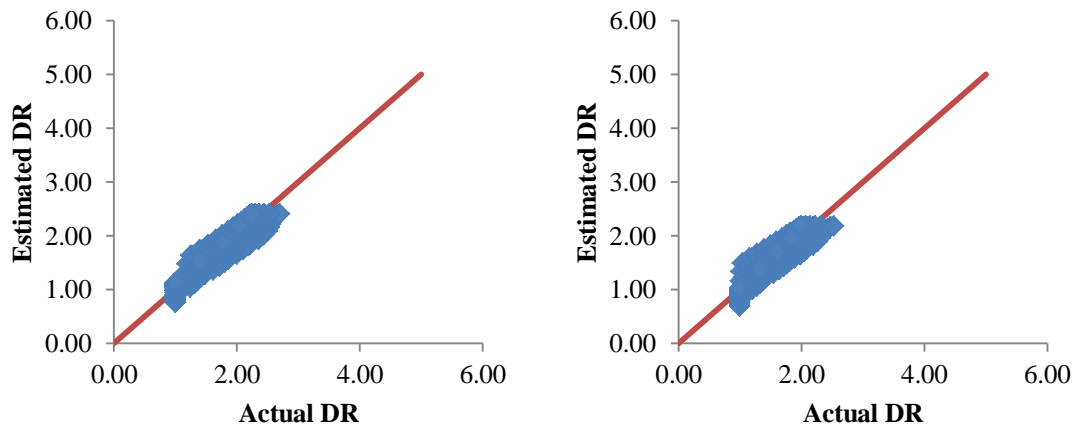


Figura 4.51 – Relação do DR real e calculado pelo modelo para d2 e d3

No que respeita à raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSEA), calculado a partir da Equação 4.12, para este modelo o valor obtido é de 0.164. Como esperado, o RMSEA deste modelo de correção é mais elevado do que o desenvolvido no Capítulo 4.2.7 devido à exclusão de uma das variáveis independentes. No que respeita ao RMSEA em função da distância de aplicação da carga é possível verificar, através da Figura 4.52, que a melhor aproximação é conseguida para d2 (a 0.20 m do ponto de aplicação da carga) com $RMSEA = 0.139$, sendo a distância para a qual o rácio da deflexão acarreta um erro mais elevado a distância d7, para 1.20 m do ponto de aplicação da carga, com $RMSEA$ de 0.213.

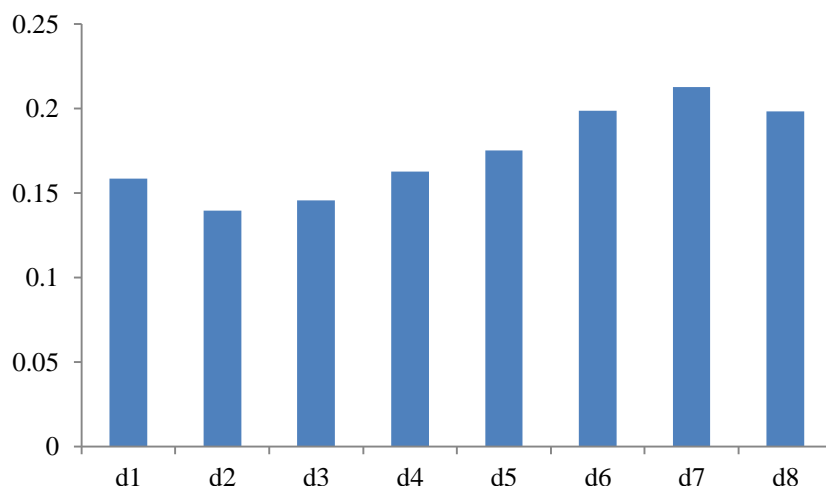


Figura 4.52 – RMSEA do DR em função da distância de aplicação da carga, para o modelo excluindo E

4.7 Comparação dos modelos de correção incluindo e excluindo a variável independente módulo de rigidez da fundação (E)

Depois de desenvolvidos os modelos corretivos cujo número de variáveis independentes varia, nomeadamente no que respeita ao módulo de rigidez da fundação que foi incluído no modelo desenvolvido inicialmente, no Capítulo 4.2.7 (aqui designado de modelo 1) e excluído no modelo desenvolvido no Capítulo 4.6 (designado de modelo 2), é possível a sua comparação.

Na Figura 4.53 e na Figura 4.54 apresenta-se a relação entre o DR calculado com o modelo 1 (modelo que inclui E) e o modelo 2 (modelo que exclui E) para as distâncias d1 a d4 (0 a 0.45 m do ponto de aplicação da carga). Como é possível observar, os valores do rácio da deflexão calculados pelos diferentes modelos não são muito distintos, apresentando-se com uma percentagem de sobreposição considerável.

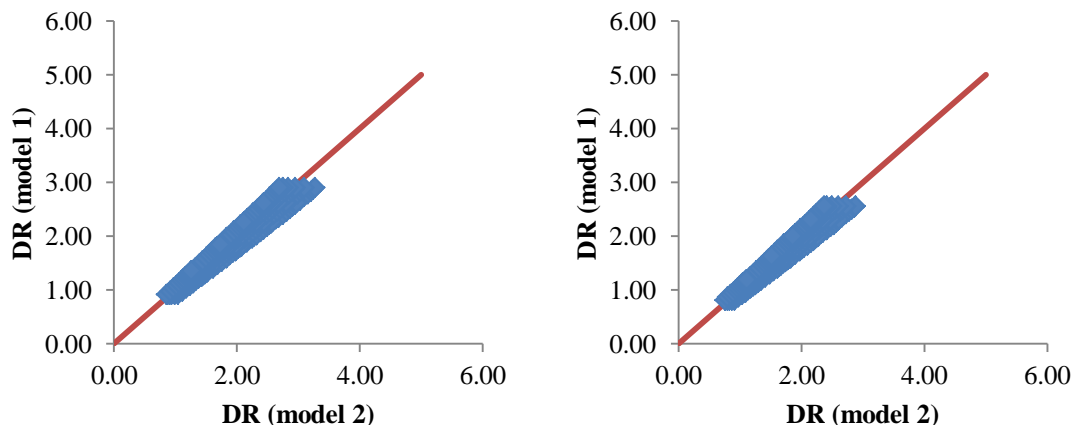


Figura 4.53 – Relação do DR calculado pelo modelo 1 e pelo modelo 2 para d1 e d2

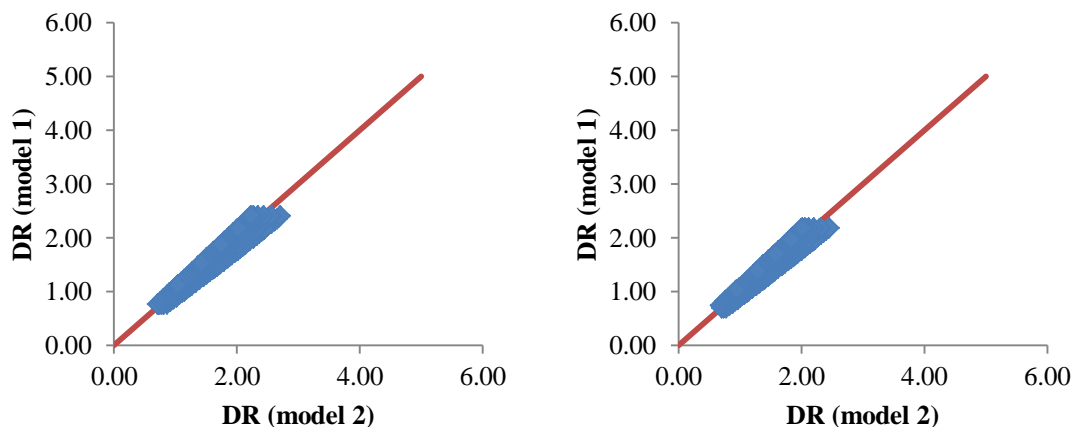


Figura 4.54 – Relação do DR calculado pelo modelo 1 e pelo modelo 2 para d3 e d4

No que concerne à diferença, em percentagem, entre o DR calculado por cada um dos modelos em função do módulo de rigidez da fundação do pavimento, pode ser observado o resultado desta análise na Figura 4.55. Como é possível verificar, para um pavimento com um módulo de rigidez da fundação de 60 MPa ou 80 MPa o erro cometido, em percentagem, é menor do que o cometido com pavimentos com módulos de fundação diferentes. Nestes casos a diferença percentual entre o DR calculado pelos modelos atinge somente um valor máximo de 8% a 1.20 m do ponto de aplicação da carga. Por outro lado, pavimentos com fundação com módulo de rigidez de 20 MPa são aqueles que acarretam uma maior diferença entre calcular DR incluindo ou não o módulo como variável independente do modelo. Neste caso a maior diferença ocorre para o ponto de aplicação da carga.

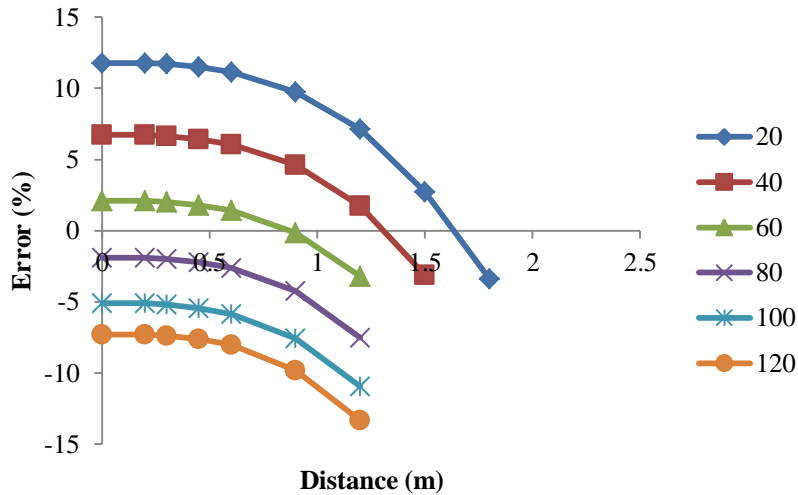


Figura 4.55 – Diferença, em percentagem, entre o cálculo de DR através do modelo 1 e do modelo 2 para cada módulo de rigidez da fundação do pavimento

Como foi possível verificar neste capítulo, o cálculo do rácio da deflexão e conseqüente correção da deflexão para uma temperatura de referência é também possível excluindo uma das variáveis independentes, nomeadamente o módulo de rigidez da fundação (E), que é a variável que possui uma menor contribuição para a obtenção do DR. Esta exclusão acarreta um erro mais elevado no entanto poderá ser adotada quando o objetivo for a utilização de um número mais reduzido de variáveis independentes.

5 Conclusões

O capítulo referente à conclusão tem como objetivo fazer um balanço do trabalho e apresentar as conclusões obtidas no final do trabalho. Assim, apresentam-se de seguida as conclusões gerais a que se seguem os trabalhos futuros que poderão aumentar a informação ou melhorar a qualidade do trabalho apresentado.

5.1 Conclusões gerais

O trabalho apresentado tem como principal objetivo o desenvolvimento de um modelo de correção das deflexões obtidas com defletómetro de impacto devido às variações de temperatura de um pavimento flexível. Além disto foi proposto também o desenvolvimento de um modelo de correção de módulos de rigidez para uma temperatura de referência, em função do tipo de mistura e da porosidade. A existência de modelos corretivos facilita a comparação de variáveis que quando estão a temperatura diferentes não são comparáveis. O estudo foi dividido em três fases principais, nomeadamente um estudo em laboratório, um estudo *in situ* e uma modelação numérica, ordem pela qual as conclusões também serão apresentadas de seguida.

Relativamente à fase de avaliação em laboratório, o objetivo era a determinação do módulo de rigidez de misturas betuminosas para obter modelos de variação do módulo com a temperatura, tendo-se obtido modelos para as misturas AC14, AC16 e AC20, sendo que os resultados obtidos permitiram concluir que o módulo de rigidez das misturas betuminosas varia aproximadamente 400 MPa por cada grau Celsius de variação de temperatura da mistura betuminosa.

Neste trabalho foram realizados ensaios *in situ* em três secções de pavimento diferentes, com o objetivo de efetuar a análise inversa e verificar a aplicação do modelo desenvolvido de correção das deflexões. A escolha de pavimentos de características distintas permitiu comprovar a forma como os defletogramas obtidos nos ensaios a diferentes temperaturas possibilita a obtenção de informação relativa ao pavimento em análise.

Os resultados obtidos com o processo de análise inversa e as deflexões obtidas *in situ* permitiram aplicar o modelo desenvolvido aos pavimentos ensaiados com defletómetro de impacto.

O objetivo inicial da definição de um modelo corretivo da deflexão de uma determinada temperatura de ensaio medida com defletómetro de impacto para uma temperatura de referência foi realizado, na medida em que o modelo foi desenvolvido para as variáveis independentes ou explicativas espessura da camada betuminosa (desde 0.1 até 0.40 m), temperatura do pavimento a meio da camada betuminosa (desde -10 até 30°C), módulo de rigidez da fundação (de 20 a 120 MPa) e distância do ponto de aplicação da carga (de 0 até 2.10 metros). Para o desenvolvimento do modelo revelou-se mais interessante a regressão não linear e considerou-se como variável dependente o rácio da deflexão, dado pela razão entre a deflexão à temperatura do ensaio e a deflexão a 30°C.

Considera-se que o objetivo foi cumprido com sucesso uma vez que o modelo apresenta um coeficiente de determinação R^2 aproximadamente igual a 0.968 o que significa que 96.8 % dos valores do rácio da deflexão dados pelo modelo são explicados pelas variáveis independentes referidas. Além deste foi calculada a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSEA) que permitiu comprovar a boa aproximação dos dados reais e obtidos pelo modelo: foi obtido um valor igual a 0.128, sendo este valor o desfasamento entre os valores medidos e os valores estimados. Considerou-se ainda importante a análise do RMSEA para cada distância de aplicação da carga. Deste estudo foi possível concluir que a estimação do DR para a distância d8 (a 1.50 m do ponto de aplicação da carga) acarreta o RMSEA mais elevado, seguido do d7. A distância que permite uma melhor aproximação é a distância d3 ou seja a medição do sensor a 0.30 m do ponto de aplicação da carga.

Além do modelo corretivo para cálculo do DR com introdução das quatro variáveis explicativas foram desenvolvidos ainda modelos específicos para cada módulo de rigidez da fundação e distância de aplicação da carga. Apesar de estes modelos terem aplicações muito particulares poderão ser úteis dada a sua fácil utilização e uma vez que possuem uma discrepância muito reduzida entre os valores reais e os calculados.

Depois da obtenção dos dados da simulação numérica através do *software* de cálculo JPav2.1 optou-se por utilizar estes dados para modelação através de redes neuronais. O objetivo desta fase foi o estudo da melhor arquitetura para a modelação dos dados introduzidos, obtendo-se os pesos de cada conexão entre neurónios e comprovando-se a percentagem de influência de cada *input* no valor do *output*. Desta análise foi possível concluir que a variável menos influente é o módulo de rigidez da fundação e a mais influente a distância ao ponto de aplicação da carga com uma percentagem de influência de 40.35%.

A abordagem que foi feita considera-se útil uma vez que seria possível, com um fator de correlação extremamente elevado, a obtenção de um valor do rácio da deflexão através da introdução dos *inputs* quando utilizada a arquitetura 4-6-1 e os parâmetros de teste definidos neste caso.

Com as conclusões obtidas na fase de modelação com redes neuronais artificiais foi possível o desenvolvimento de um modelo adicional, que permite a correção da deflexão para uma temperatura de referência de 30°C, excluindo como variável independente o módulo de rigidez da fundação, uma vez que é a variável com menor contribuição para o valor da variável dependente DR.

Do desenvolvimento do novo modelo e comparação com o desenvolvido no Capítulo 4.2.7 foi possível concluir que o novo modelo poderia ser vantajoso na medida em é mais simples do que o anterior (três variáveis independentes e não quatro), no entanto o erro que acarreta é mais elevado.

5.2 Trabalhos futuros

A enumeração dos trabalhos futuros diz respeito ao que poderá ser acrescentado ao trabalho para melhorar a qualidade dos resultados obtidos ou a continuação dos trabalhos iniciados neste estudo.

No que concerne ao desenvolvimento do modelo de correção dos módulos de rigidez em função da temperatura de ensaio e do tipo de mistura betuminosa, os trabalhos

futuros referem-se, principalmente, à consideração de outras porosidades mais representativas das misturas em estudo, principalmente em relação à mistura AC14.

Além disto, a conceção de mais misturas com porosidade variável seria útil à formulação do modelo, tornando-o mais preciso. Refere-se neste caso as misturas AC25 e AC32.

No que respeita à verificação e possível calibração do modelo desenvolvido para correção da deflexão, seria interessante a realização de algumas séries de ensaios nas mesmas secções de pavimento mas com gamas de temperaturas diferentes, de preferência desde os -10°C até aos 30°C . Estas campanhas permitiriam além de verificar o comportamento do pavimento e as diferenças quando estão com temperaturas mais elevadas, verificar a adequação do modelo como realizado no Capítulo 4 para valores de temperatura entre 10 e 30°C . Idealmente deveriam ser feitos ensaios durante pelo menos um ano, uma vez por mês de forma a avaliar a evolução dos defletogramas do pavimento com a alteração da temperatura.

Tendo em conta que muitos pavimentos possuem estruturas constituídas por mais do que uma camada granular e betuminosa, a realização de um modelo que permitisse a correção da deflexão para uma estrutura deste tipo seria também muito proveitoso.

6 Referências Bibliográficas

- AASHTO, 1993. *Guide for design of pavement structures* American Association of State Highway and Transportation Officials, ed., Washington, D.C.
- Antunes, M.L., 1993. *Avaliação da Capacidade de carga de pavimentos utilizando ensaios dinâmicos*. Instituto Superior Técnico.
- Asphalt Institute, 1983. *Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation*, Maryland: Asphalt Institute.
- Azevedo, M., 1993. *Características Mecânicas de Misturas Betuminosas para Camadas de Base de Pavimentos*. Universidade Técnica de Lisboa.
- Baltzer, S. & Jansen, J.M., 1994. Temperature Correction of Asphalt-Moduli for FWD-Measurements. In *Proc. of the 4 th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields*. Minneapolis, MN, pp. 753–768.
- Basheer, I. & Hajmeer, M., 2000. Artificial Neural Networks: Fundamentals, Computing, Design and Application. *Journal of Microbiological Methods*, pp.3–31.
- Braga, A.P., Carvalho, A. & Ludemir, T.B., 2000. *Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações*, Rio de Janeiro.
- Branco, F., Pereira, Paulo & Santos, L.P., 2011. *Pavimentos Rodoviários* 4th ed. Almedina, ed., Coimbra.
- Chen, D., Bilyeu, J., Lin, H., Murphy, M., 2000. Temperature Correction on Falling Weight Deflectometer Measurements. *Transportation Research Record 1716*, pp.30–39.
- Neto, S.A.D., 2004. *Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas Asfálticas Modificadas com Borracha Granulada de Pneus Usados*. Universidade de Brasília.
- Estradas de Portugal, S.A., 2009. *Caderno de Encargos Tipo Obra - Características dos materiais*.
- Fang, C., Haddock, J., Galal, K., Ward, D., 2003. *Initial Study for Cost-Effectiveness of Joint / Crack Sealing*, Indianapolis.
- Fernando, E., Liu, W. & Ryu, D., 2001. *Development of a procedure for temperature correction of backcalculated AC modulus*, Texas.
- FHWA, 2000. *LTPP Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements*, Maryland.

- Freeman, J. & Skapura, D., 1991. *Neural Networks Algorithms , Applications , and Programming Techniques*,
- Freitas, E., 1999. *Estudo da Evolução do Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis*. Universidade do Minho.
- Freitas, E. & Pereira, Paulo, 2001. Estudo da Evolução do Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis. , pp.47–58.
- Gallant, S., 1993. *Neural Network Learning and Expert Systems*, Massachusetts.
- Goktepe, A.B., Agar, E. & Lav, A.H., 2005. Advances in backcalculating the mechanical properties of flexible pavements. *Advances in engineering software*, 37, pp.421–431.
- Van Gorp, C., 1995. *Characterization of Seasonal Influences on Asphalt Pavements with the use of Falling Weight Deflectometers*,
- Haykin, S., 1994. *Neural Networks a Comprehensive Foundation*, Ontario.
- Hornik, K., Stinchcombe, M. & White, H., 1989. Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators. *Neural Networks*, 2, pp.359–366.
- Hugo, F., Chen, D., Smit, A., Bilyeu, J., 2001. *Report on a comparison of the effectiveness of two pavement rehabilitation strategies on US 281 near Jacksboro, Texas*.
- Jain, A. & Mao, J., 1996. Artificial Neural Networks: A Tutorial. *Computer*, pp.31–44.
- Johnson, A.M. & Baus, R.L., 1992. *Alternative Method for Temperature Correction of Backcalculated Equivalent Pavement Moduli*, Washington, D.C.
- Jung, F., 1989. *Interpretation of Deflection Basin for Real-world Layer Materials of Flexible Pavements*, Ontario.
- Killingsworth, B. & Von Quintus, H., 1997. *Backcalculation of Layer Moduli of LTPP General Pavement Study (GPS) Sites. Publication No. FHWA-RD-97-086*, Texas.
- Kim, Y., Hibbs, B., Lee, Y., 1993. Temperature Correction of Deflections and Backcalculated Asphalt Concrete Moduli.
- Kim, Y Richard & Park, H., 2002. *Use of Falling Weight Deflectometer Multi-Load Data For Pavement Strength Estimation. Report No. FHWA/NC/2002-006*, Raleigh.
- Santos, M.J.L., 2009. *Dimensionamento de camadas de reforço de pavimentos rodoviários flexíveis*. Universidade de Aveiro.

- Lima Nunes, T.V., 2003. *Método de Previsão de Defeitos em Estradas Vacinais de Terra com Base no Uso das Redes Neurais Artificiais: Trecho de Aquiraz-CE*. Universidade Federal do Ceará.
- Loesch, C. & Sari, S.T., 1996. *Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e Modelos*,
- Lukanen, E.O., Stubstad, R. & Briggs, R., 2000. *Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement*,
- Kim, Y., Hibbs, B., Lee, Y., 1993. Temperature Correction of Deflections and Backcalculated Asphalt Concrete Moduli.
- Minhoto, M.J. da C., 2005. *Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos rodoviários flexíveis*. Universidade do Minho.
- Oh, J., Fernando, E., Lee, S., Holzschuher, C., 2012. Correlation of Asphalt Concrete Layer Moduli Determined from Laboratory and Nondestructive Field Tests. , (March), pp.361–371.
- Pais, J. & Pereira, P., 2002. A influência da temperatura na rigidez das misturas betuminosas. In *2º Congresso Rodoviário Português*. Lisboa, pp. 259–304.
- Pais, J., Pereira, P. & Azevedo, M., 2000. Ensaio mecânicos para caracterização de misturas betuminosas. In *1º Congresso Rodoviário Português*. Lisboa, pp. 639–649.
- Pais, Jorge, 1999. *Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis*. Universidade do Minho.
- Park, D., Buch, N. & Chatti, K., 2000. Development of Effective Layer Temperature Prediction Model and Temperature Correction Using FWD Deflections. In *2001 TRB Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington, D.C.
- Pereira, J., 2007. *Um procedimento de retroanálise para pavimentos flexíveis baseado na teoria do ponto inerte e em modelagem matemática*. Universidade de São Paulo.
- Pereira, O.A., 1971. *Pavimentos Rodoviários - Volume II LNEC*, Lisboa.
- Pereira, P. & Miranda, V., 1999. *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*, Braga.
- García, J.A.R. & Castro, M., 2011. Analysis of the temperature influence on flexible pavement deflection. *Construction and Building Materials*, 25(8), pp.3530–3539.
- SHRP, 1993a. *SHRP 's Layer Moduli Backcalculation Procedure*, Washington, D.C.
- SHRP, 1993b. *SHRP Procedure for Temperature Correction of Maximum Deflections*, Washington, DC.

- Teixeira, A.M.S., 2000. *Caracterização da Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas em Equipamento Servopneumático*. Universidade do Porto.
- Sivapathasekaran, C., Soumen, M., Ray, A., Gupta, A., Ramkrichna, S., 2010. Artificial neural network modeling and genetic algorithm based medium optimization for the improved production of marine biosurfactant. *Bioresource Technology*, 101(8), pp.2884–2887.
- Spiegel, M., 1984. *Estatística* 2nd ed., Rio Grande do Sul: McGraw Hill.
- The Highways Agency, 2008. Data for Pavement Assessment. In *Design Manual for Roads and Bridges: pavement design and maintenance. Section 3. Pavement maintenance assessment. Part 2. N° HD 29/08*.
- Ullidtz, P., 1987. *Pavement Analysis*. Elsevier.
- Witczak, M.W. & Fonseca, O., 1996. Revised Predictive Model for Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record 1540, Transportation Research Board*, pp.15–23.
- Zupan, J. & Gasteiger, J., 1993. *Neural Networks for Chemists: An Introduction*, New York.