



Carla Alexandra Andrade Gil

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Estudo da ligação entre camadas betuminosas de pavimentos flexíveis

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil- Perfil de Construção

Orientador: Engenheiro Luís Quaresma, Professor Auxiliar
Convidado, Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

Coorientadora: Doutora Ana Cristina Freire, Investigadora Auxiliar,
Departamento de Transportes do Laboratório
Nacional de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Doutor João Almeida, Professor Associado da Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Arguente: Doutora Simona Fontul, Professora Auxiliar Convidada da
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Vogal: Doutora Ana Cristina Freire, Investigadora Auxiliar do Laboratório
Nacional de Engenharia Civil



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

dezembro de 2015

‘Copyright’ Carla Alexandra Andrade Gil, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais e irmã

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a todos os que contribuíram direta e indiretamente para a realização desta dissertação:

Ao meu orientador científico, Professor Luís Quaresma pela disponibilidade e por toda a partilha de conhecimentos, e à Doutora Ana Cristina Freire, coorientadora científica, por toda a compreensão, disponibilidade, atenção, amizade e incentivo e partilha de conhecimentos, sem os quais não seria possível realizar este trabalho. Quero agradecer também a possibilidade que me foi dada de poder realizar este trabalho no Núcleo de Infraestruturas de Transportes do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, representado pelo Investigador Coordenador Presidente do LNEC Carlos Pina, pelos meios facultados, e ao Técnico Superior Nuno Silvestre do Departamento de Materiais e à Eng.^a Dora Santos do Departamento de Edifícios, pela entreatajuda e disponibilidade prestados ao desenvolvimento deste trabalho.

Às empresas S&P Clever Reinforcement Iberica, BRISA Autoestradas de Portugal e ANA - Aeroportos de Portugal, pela disponibilização de meios e materiais à realização do presente estudo.

A toda a equipa do DT/NIT por me terem acolhido muito bem desde o primeiro dia, por todo o companheirismo e bons momentos passados, em especial ao Vítor Antunes, Nuno Simão, Vânia Marecos, Joana Machado, Diogo Marques e Patrícia Costa.

Ao Eng.^o Pedro Marcelino, ao Sr. José Reimão, ao Sr. Eduardo Coimbra, ao Eng.^o Nuno Nunes e ao Eng.^o Daniel Fernandes, pelo auxílio na realização dos ensaios, por toda a simpatia, disponibilidade e partilha de conhecimentos.

Ao Sr. João Costa pela amizade, simpatia, companheirismo, ajuda, transmissão de conhecimentos e disponibilidade na realização dos ensaios.

Aos meus colegas e amigos João Nabais, João Valadares, Pedro Antunes e André Pereira, pelos bons momentos, amizade e companheirismo ao longo destes anos.

Aos meus grandes amigos Ana Catarina Guerra, Eduarda Sousa, João Serafim, Marisa Conceição, Rúben Santos e Tiago Antunes pela amizade incondicional, por todos os bons momentos, por me incentivarem e partilharem comigo todas as minhas vitórias.

Um agradecimento muito especial à minha irmã Susana Gil, por toda a amizade, amor, companheirismo, apoio, incentivo, compreensão e ajuda ao longo de toda a minha vida.

E por último, o mais importante e sentido agradecimento aos meus pais, Deotília e Armando, pelos valores, educação e princípios que me inculcaram, pelo amor, apoio e compreensão incondicionais, a vocês dedico esta dissertação pois é graças ao vosso esforço e empenho que tudo foi possível.

RESUMO

A ligação entre camadas constitui um dos aspetos fundamentais no comportamento de um pavimento rodoviário. O modo de funcionamento de um pavimento flexível está dependente das características dos materiais de cada camada, mas também das respetivas condições de fronteira, ou seja, das características das respetivas interfaces. Uma correta ligação entre camadas permite ao pavimento funcionar como um todo, esta ligação é normalmente alcançada com a aplicação de uma fina camada de emulsão betuminosa.

Com a entrada em serviço de um pavimento, devido às tensões geradas pela passagem dos veículos, este começa a sofrer degradações à superfície, até que finda a sua vida útil procede-se à sua reabilitação. Na reabilitação de pavimentos é necessário um especial cuidado na interface do pavimento existente com novo pavimento aplicado, para que as fissuras existentes não se propaguem para as novas camadas reabilitadas.

A presente dissertação de mestrado, estuda a ligação entre camadas de um pavimento cuja técnica de reforço de reabilitação é a introdução de uma grelha que limita a propagação de fendas. A ligação entre camadas é avaliada através de ensaios de corte pelo método de *Leutner* modificado e de tração pelo método *Pull-off*, para duas obras distintas, com constituições de pavimentos e com taxas de aplicação de regas de colagem diferentes, com dois tipos de grelhas de reforço e para amostras recolhidas em obra e fabricadas em laboratório.

Os resultados são analisados e comparados entre si, de onde se conclui existir uma melhor ligação entre camadas para interfaces que não possuem grelhas de reforço em detrimento das que possuem, contudo a diminuição da resistência da ligação aquando desta introdução não é demasiado expressiva, o que valida esta técnica de reforço como não prejudicial à integridade da ligação entre camadas. Uma maior dosagem de rega de colagem contribui para uma maior ligação entre camadas, embora careça de um estudo mais aprofundado para definir intervalos de aplicação óptimos para uma dada constituição de pavimento.

Este estudo valida para os pavimentos nacionais, os valores recomendados na norma Suíça e na norma Alemã, de resistência ao corte mínima para interfaces de ligação entre camadas de base de 12 kN e para interfaces de ligação entre camadas de desgaste de 15 kN. No entanto, considera-se que estes valores poderão ser mais exigentes, deixando os valores obtidos margem para recomendar valores mais elevados, requerendo portanto mais estudos para confirmar estes limites.

Termos chave: ligação entre camadas betuminosas, interface, reabilitação de pavimentos, tensão de corte, ensaio de *Leutner* modificado, ensaio de *Pull-off* em pavimentos flexíveis.

ABSTRACT

Bond between layers is a fundamental aspect in the behavior of a road pavement.

The flexible pavement operating mode is dependent on the material characteristics of each layer and the respective boundary conditions. Proper bonding between layers allows the pavement to function as a whole, this connection is normally achieved by applying a thin layer of bitumen emulsion.

Due to stresses caused by passing vehicles with the entry into service of a pavement, it begins to suffer degradation on the surface until its life cycle ends and provide for the rehabilitation. On the rehabilitation of the pavement, the interface between the existing and the new pavement takes special care so that existing cracks do not propagate to the new rehabilitated layers.

This dissertation studies the bond between pavement layers which reinforcement and rehabilitation technique is to introduce a grating that limits crack propagation. The bond between pavement layers is evaluated by the Modified *Leutner* shear test and the *Pull-off* method, for two different cases with different pavement constitutions and tack coat application rates, with two different types of reinforcement grids, specimens collected from the pavement and fabricated in the laboratory.

The results are analyzed and compared, from which it follows that the bond between pavement layers is better when the interface does not have reinforcement grids in the expense of having, however the decrease in bond strength with this introduction is not too significant, which validates this rehabilitation technique. A bigger rate application of a tack coat increases the bond between pavement layers, however this statement needs more research to define optimal application ranges for a pavement type constitution.

This study validates for these road pavements, Swiss and German standards which require as minimum values for interlayer bond adhesion on base courses 12 kN and for surface course 15 kN. However, it is considered that these values could be higher, requiring further study to confirm these limits.

Keywords: bond between bituminous layers, interface, pavement rehabilitation, shear stress, modified *Leutner* shear test, Pull-off test method for flexible pavements.

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivo e metodologia.....	1
1.3. Organização da dissertação.....	2
2. Caracterização da Ligação entre Camadas e seu Efeito no Comportamento de Pavimentos Flexíveis	3
2.1. Introdução.....	3
2.2. Importância da ligação entre camadas betuminosas.....	3
2.3. Factores que afectam a ligação entre camadas betuminosas.....	12
2.4. Principais métodos para avaliar a ligação entre camadas betuminosas	15
2.4.1. Introdução.....	15
2.4.2. Shear bond test (Ensaio de <i>Leutner</i> modificado).....	18
2.4.3. <i>Tensile Bond Test</i> (Ensaio de <i>Pull-off</i>).....	23
2.4.4. <i>Torque Bond Test</i>	27
2.5. Considerações finais	28
3. Caso de Estudo.....	29
3.1. Considerações iniciais.....	29
3.2. Descrição do caso de estudo	29
3.3. Avaliação da ligação entre camadas betuminosas com e sem presença de grelha de reforço.....	39
3.3.1. Ensaio de <i>Leutner</i> Modificado.....	39
3.3.2. Ensaio de tração <i>Pull-off</i>	56
3.4. Considerações finais	64
4. Análise de Resultados	67
4.1. Análise comparativa dos resultados obtidos	67
4.2. Considerações finais	76
5. Conclusões.....	87
5.1. Conclusões finais	87
5.2. Desenvolvimentos futuros	90
Referências Bibliográficas.....	91
Referências Normativas.....	95
Anexos	97

Anexo A – Folhas Ensaio <i>Leutner</i> Obra A - Plena Via com Grelha Fibra de Carbono (Amostras de campo).....	99
Anexo B – Folhas Ensaio <i>Leutner</i> Obra A - Plena Via com Grelha Fibra de Carbono (Amostras de laboratório)	103
Anexo C – Folhas Ensaio <i>Leutner</i> Obra A - Trecho Experimental com Grelha Fibra de Carbono (Amostras de campo).....	105
Anexo D – Folhas Ensaio <i>Leutner</i> Obra B - Plena Via sem Grelha de Reforço (Amostras de campo)	107
Anexo E – Folhas Ensaio <i>Leutner</i> Obra B - Plena Via com Grelha Fibra de Vidro (Amostras de campo)	111
Anexo F – Folhas Ensaio <i>Leutner</i> Obra B - Trecho Experimental com Grelha Fibra de Vidro (Amostras de campo).....	115
Anexo G – Folhas Ensaio <i>Leutner</i> Obra B - Trecho Experimental com Grelha Fibra de Vidro Simulador de Tráfego (Amostras de campo).....	117
Anexo H – Folhas Ensaio <i>Leutner</i> Obra B - Trecho Experimental com Grelha Fibra de Vidro (Amostras de laboratório)	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Constituição tipo de um pavimento flexível (Silva, 2005)	4
Figura 2.2 - Aplicação de rega de colagem (Guimarães, 2013) a) por meio de barra espalhadora, b) por meio de caneta.....	7
Figura 2.3 - Variação da tensão de corte na interface com o período de cura, adaptado de Plug & Bondt, (2010)	8
Figura 2.4 - Forças geradas na interface das camadas de pavimentos betuminosas com a passagem de veículos, adaptado de Raab & Partl, (2004).....	9
Figura 2.5 - Degradação do pavimento devido a falhas na ligação entre camadas betuminosas, PavInt (2015)	10
Figura 2.6 - Grelha de fibra de vidro	11
Figura 2.7 - Grelha de fibra de carbono	11
Figura 2.8 - Aspecto das grelhas em fibra de vidro ou fibra de carbono prontas a aplicar em obra	11
Figura 2.9 - Aplicação de rega de colagem, adaptado de Lancaster (2009) a) aplicação cuidada da rega de colagem, b) aplicação deficiente da rega de colagem.....	14
Figura 2.10 - Métodos destrutivos de análise da ligação entre camadas, adaptado de RILEM (2012)	17
Figura 2.11 - Carregamento aplicado nos métodos destrutivos mais comuns para avaliação da ligação entre camadas betuminosas, adaptado de Vaitkus (2012)	17
Figura 2.12 - Esquema dispositivo <i>Leutner</i> modificado, adaptado de <i>Manual of Contract for Highway Works</i> (2008)	21
Figura 2.13 - Dispositivo de ensaio <i>Pull-off</i> , prEN 12697-48	23
Figura 2.14 - Aparelho de tração <i>Pull-off</i> manual, Oz (2015)	25
Figura 2.15 – Mecanismos de rotura do ensaio <i>Pull-off</i> , adaptado de Nabais (2015).....	26
Figura 3.1 - Constituição do pavimento da plena via da obra A	30
Figura 3.2 - Grelha de fibra de carbono aplicada no pavimento da obra A	32
Figura 3.3 - Passagem com o cilindro para promover a perfeita adesão da grelha de fibra de carbono à camada de base inferior da obra A	32
Figura 3.4 - Camadas correspondentes à plena via da obra B cuja interface em análise não possui grelha de reforço	33
Figura 3.5 – Camadas correspondentes à plena via da obra B cuja interface em análise possui grelha de reforço em fibra de vidro	34
Figura 3.6 – a) Trecho experimental obra B e b) Recolha de amostras	35
Figura 3.7 - Camadas correspondentes ao trecho experimental da obra B cuja interface em análise possui grelha de reforço em fibra de vidro	36
Figura 3.8 - Aplicação da rega de colagem, por meio de barra espargidora	37
Figura 3.9 - Aplicação da grelha de reforço em fibra de vidro	37

Figura 3.10 - Passagem com o cilindro para promover a aderência entre a grelha de fibra de vidro e a emulsão betuminosa aplicada.....	37
Figura 3.11 - Recolha de amostras de campo por sondagem à rotação.....	39
Figura 3.12 – Aspecto do provete na chegada ao laboratório.....	40
Figura 3.13 - Corte dos provetes para o ensaio de <i>Leutner</i> modificado.....	40
Figura 3.14 - Proвете preparado para ensaio <i>Leutner</i> modificado	40
Figura 3.15 - Processo de fabrico de lajes em laboratório a) compactação da camada subjacente, b) aquecimento da grelha, c) compactação da grelha, d) compactação da camada sobrejacente	41
Figura 3.16 - Preparação de laje fabricada em laboratório para caroteamento	42
Figura 3.17 - Ensaio de <i>Leutner</i> modificado	43
Figura 3.18 - Inspeção visual do tarolo ACG1 após ensaio de <i>Leutner</i> modificado, a) Aspecto do tarolo após ensaio b) Interface da camada superior c) Interface da camada inferior.....	45
Figura 3.19 - Inspeção visual do tarolo ACG5 após ensaio de <i>Leutner</i> modificado, a) Aspecto do tarolo após ensaio b) Interface da camada superior c) Interface da camada inferior.....	46
Figura 3.20 - Valores médios e desvio-padrão dos ensaios <i>Leutner</i> modificado para amostras que não possuem grelha de reforço na interface em estudo.....	55
Figura 3.21 - Valores médios e desvio-padrão dos ensaios <i>Leutner</i> modificado para amostras que possuem grelha de reforço em fibra de carbono na interface em estudo	55
Figura 3.22 - Valores médios e desvio-padrão dos ensaios <i>Leutner</i> modificado para amostras que possuem grelha de reforço em fibra de vidro na interface em estudo.....	56
Figura 3.23 - Recolha de lajetas em obra para ensaio <i>Pull-off</i>	57
Figura 3.24 - Preparação das amostras para ensaio de tração <i>Pull-off</i> a) Perfuração das camadas para isolamento da área de ensaio b) Colagem das pastilhas metálicas de ensaio c) Ensaio de tração <i>Pull-off</i>	58
Figura 3.25 - Provetes de ensaio de tração <i>Pull-off</i> da obra A	59
Figura 3.26 - Rotura do provete A1 da obra A após ensaio de tração <i>Pull-off</i> a) Parte subjacente à interface de rotura b) Proвете sobrejacente à interface de rotura	60
Figura 3.27 - Rotura do provete A2 da obra A após ensaio de tração <i>Pull-off</i> a) Parte subjacente à interface de rotura b) Proвете sobrejacente à interface de rotura	60
Figura 3.28 - Provetes de ensaio de tração <i>Pull-off</i> da obra B	61
Figura 3.29 - Rotura pela ligação entre a pastilha metálica de ensaio e a camada de desgaste, provete A1 da obra A	62
Figura 3.30 - Rotura do provete B2 da obra B após ensaio de tração <i>Pull-off</i> a) Parte subjacente à interface de rotura, b) Proвете sobrejacente à interface de rotura	63
Figura 3.31 – Rotura pela camada de base dos provetes da obra B após ensaio de tração <i>Pull-off</i> a) Parte subjacente à interface de rotura, b) Proвете sobrejacente à interface de rotura	63
Figura 4.1 - Resultados do ensaio de <i>Leutner</i> modificado para a plena via da obra B com e sem grelha de reforço em fibra de vidro	67

Figura 4.2 - Resultados do ensaio de <i>Leutner</i> modificado para a plena via e para o trecho experimental da obra B	68
Figura 4.3 - Resultados do ensaio de <i>Leutner</i> modificado para a plena via e para o trecho experimental da obra A	70
Figura 4.4 - Resultados do ensaio de <i>Leutner</i> modificado para provetes retirados em campo e produzidos em laboratório referentes à plena via da obra A	71
Figura 4.5 - Resultados do ensaio de <i>Leutner</i> modificado para provetes retirados em campo e produzidos em laboratório referentes ao trecho experimental da obra B	72
Figura 4.6 - Resultados do ensaio de <i>Leutner</i> modificado para provetes retirados em campo e produzidos em laboratório referentes ao trecho experimental da obra B, a) amostras de laboratório correspondentes à lajeta 1, b) amostras de laboratório correspondentes à lajeta 2	73
Figura 4.7 - Resultados do ensaio de <i>Pull-off</i> , para amostras recolhidas em campo correspondentes à plena via da Obra A com grelha de fibra de carbono, e ao trecho experimental da Obra B com grelha de fibra de vidro	74
Figura 4.8 - Resultados do ensaio de <i>Leutner</i> modificado e do ensaio de <i>Pull-off</i> , para amostras recolhidas em campo correspondentes à plena via da Obra A	75
Figura 4.9 - Resultados do ensaio de <i>Leutner</i> modificado e do ensaio de <i>Pull-off</i> , para amostras recolhidas em campo correspondentes ao trecho experimental da Obra B	75
Figura 4.10 - Valores médios de tensão de corte máxima pelo método de <i>Leutner</i> modificado para interfaces com e sem presença de grelha de reforço	76
Figura 4.11 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de <i>Leutner</i> modificado para todos os provetes	77
Figura 4.12 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de <i>Leutner</i> modificado para as camadas que não possuem grelha de reforço na interface de estudo	78
Figura 4.13 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de <i>Leutner</i> modificado para as camadas que possuem grelha de reforço na interface de estudo	79
Figura 4.14 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de <i>Leutner</i> modificado para as camadas que possuem grelha de reforço em fibra de carbono na interface de estudo	80
Figura 4.15 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de <i>Leutner</i> modificado para as camadas que possuem grelha de reforço em fibra de vidro na interface de estudo	81
Figura 4.16 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de <i>Leutner</i> modificado para as camadas que possuem a camada subjacente da interface de estudo fresada	82
Figura 4.17 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de <i>Leutner</i> modificado para as camadas que possuem a camada subjacente da interface de estudo nova	83
Figura 4.18 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de <i>Leutner</i> modificado para a interface de ligação a camadas de base	84
Figura 4.19 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de <i>Leutner</i> modificado para a interface de ligação a camadas de desgaste	85

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Proporções da mistura dos agregados na camada betuminosa sobrejacente à grelha na plena via da obra A.....	31
Quadro 3.2 - Proporções da mistura dos agregados na camada betuminosa subjacente à grelha na plena via da obra A.....	31
Quadro 3.3 - Proporções da mistura dos agregados na camada betuminosa sobrejacente à interface em estudo, na plena via da obra B.....	34
Quadro 3.4 - Proporções da mistura dos agregados na camada betuminosa sobrejacente à grelha no trecho experimental da obra B	36
Quadro 3.5 - Quadro síntese da constituição das camadas cuja interface em estudo não possui grelha de reforço.....	38
Quadro 3.6 - Quadro síntese da constituição das camadas cuja interface em estudo possui grelha de reforço.....	38
Quadro 3.7 - Síntese dos valores recomendados pela bibliografia para força, tensão e deslocamento de corte.....	43
Quadro 3.8 – Resultados do ensaio <i>Leutner</i> modificado para amostras de campo recolhidas da plena via da obra A	44
Quadro 3.9 - Valores médios e de desvio padrão para amostras de campo recolhidas da plena via da obra A, excluindo o provete ACG5.....	46
Quadro 3.10 – Resultados do ensaio <i>Leutner</i> modificado para amostras fabricadas em laboratório, correspondentes à plena via da obra A.....	47
Quadro 3.11 - Resultados do ensaio <i>Leutner</i> modificado para amostras de campo recolhidas do trecho experimental da obra A	48
Quadro 3.12 – Resultados do ensaio <i>Leutner</i> modificado para amostras de campo recolhidas da plena via da obra B cuja interface não possui grelha de reforço	49
Quadro 3.13 – Resultados do ensaio <i>Leutner</i> modificado para amostras de campo recolhidas da plena via da obra B.....	50
Quadro 3.14 – Resultados do ensaio <i>Leutner</i> modificado para amostras de campo recolhidas do trecho experimental da obra B	51
Quadro 3.15 – Resultados do ensaio <i>Leutner</i> modificado para amostras de campo recolhidas do trecho experimental da obra B, previamente ensaiados no simulador de tráfego.....	52
Quadro 3.16 – Resultados do ensaio <i>Leutner</i> modificado para amostras fabricadas em laboratório, correspondentes ao trecho experimental da obra B	53
Quadro 3.17 - Resultados do ensaio de <i>Leutner</i> modificado de Marcelino, et al. (2013), sem presença grelha de reforço e com presença de grelha de reforço em fibra de vidro	54
Quadro 3.18 – Resultados do ensaio <i>Pull-off</i> para plena via da obra A com presença de grelha de fibra de carbono.....	59

Quadro 3.19 – Valor médio e desvio-padrão dos resultados do ensaio <i>Pull-off</i> para a plena via da obra A com presença de grelha de fibra de carbono, excluindo o provete A5	61
Quadro 3.20 – Resultados do ensaio <i>Pull-off</i> para trecho experimental da obra B com presença de grelha de fibra de vidro.....	62
Quadro 3.21 - Valor médio e desvio-padrão dos resultados do ensaio <i>Pull-off</i> para o trecho experimental da obra B com presença de grelha de fibra de vidro, excluindo os provetes B1, B3, B5 e B6	64
Quadro 3.22 - Casos estudados para ensaio de <i>Leutner</i> modificado e para ensaio de <i>Pull-off</i>	64

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Siglas

ABGE – Agregado Britado de Granulometria Extensa
AC – Asphalt Concrete
ASTM – American Society for Testing and Materials
BB – Betão Betuminoso
BBr – Betão Betuminoso Rugoso
CEN – Comité Européen de Normalisation
DEC-FCT – Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias
DNER – Departamento nacional de estradas de rodagem
DT-NIT – Departamento de transportes do Núcleo de Infraestruturas de Transportes
EN – European Norm
EP – Estradas de Portugal
FCT-UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
FWD – Falling Weight Deflectometer (Deflectómetro de impacto)
IP – Infraestruturas de Portugal
IPQ – Instituto Português da Qualidade
JAE – Junta Autónoma de Estradas
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MB – Macadame Betuminoso
MB – Mistura Betuminosa
MBAM – Mistura Betuminosa de Alto Módulo
NP – Norma Portuguesa
PSPA - Portable Seismic Pavement Analyser
SMA – Stone Mastic Asphalt
SN – Norma Suíça

Abreviaturas e Símbolos:

A - Área
D - Diâmetro
dp – Desvio padrão
F – Força aplicada/carga aplicada
 $F_{máx}$ – Força máxima
K – Módulo de rigidez
Méd – Valor médio
r – raio do provete
 δ – Deslocamento
 σ – Tensão

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

A ligação entre camadas constitui um dos aspectos essenciais no desempenho dos pavimentos, reflectindo a capacidade que estes têm de funcionar como um todo. A consideração do grau de ligação entre camadas tem influência na forma como o pavimento é modelado e no seu comportamento durante a sua vida útil.

Quando um pavimento se apresenta degradado à superfície, e tendo em conta uma gestão de recursos eficaz e sustentável tanto a nível ambiental como económico, recorre-se à sua recuperação e consequente reabilitação. Dada a inviabilidade da total substituição do pavimento existente, efectua-se, em geral, a remoção das camadas superiores, geralmente constituídas por misturas betuminosas, e posterior substituição por novas camadas. A descontinuidade gerada com esta reabilitação carece de especial cuidado, para que as fissuras existentes nas camadas antigas, do pavimento degradado, não se propaguem para as camadas novas.

A técnica de reforço e reabilitação de pavimentos estudada na presente dissertação é a de introdução de uma grelha de reforço que se apresenta como um elemento limitador da propagação de fendas. Não obstante e independentemente da eficácia apresentada por esta técnica de reforço, é necessário garantir o desempenho e a durabilidade do pavimento, dando especial importância à ligação entre as camadas contíguas a esta solução.

1.2. Objectivo e metodologia

A presente dissertação de mestrado tem como objectivo o estudo da ligação entre camadas betuminosas de pavimentos flexíveis. Para este estudo recorreu-se a ensaios de corte e de tração.

A campanha experimental realizada decorreu da análise de duas obras reais, uma composta por um pavimento aeroportuário e outra por um pavimento rodoviário, sendo que para o ensaio de corte foram analisadas amostras de campo com e sem aplicação de grelha de reforço e amostras produzidas em laboratório com a presença de grelha de reforço colocada entre camadas betuminosas, e para o ensaio de tração foram analisadas amostras de campo com incorporação de grelha de reforço.

Este estudo pretende:

- Estudar o comportamento da ligação entre camadas betuminosas do pavimento analisando amostras recolhidas em campo e amostras fabricadas em laboratório;

- Estudar o comportamento da ligação entre camadas betuminosas do pavimento com e sem aplicação de grelha de reforço;
- Suportar a proposta de limites a considerar na avaliação da resistência ao corte da ligação entre as camadas betuminosas de um pavimento flexível;

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação de mestrado está dividida em quatro capítulos.

O primeiro capítulo, **Introdução**, onde é feito um enquadramento do tema e onde são explicitados os objectivos e a metodologia utilizada na realização do estudo do âmbito desta dissertação.

O segundo capítulo, **Caracterização da ligação entre camadas e seu efeito no comportamento de pavimentos flexíveis**, onde é feita uma breve revisão da literatura sobre a importância, fatores que afetam e métodos para avaliar a ligação entre camadas betuminosas. Neste capítulo é também abordada a aplicação de grelhas de reforço na reabilitação de pavimentos.

O terceiro capítulo, **Caso de estudo**, onde é feita a descrição das obras em análise neste estudo, bem como a recolha e preparação das amostras e, onde são apresentados os resultados dos ensaios realizados e a análise comparativa dos mesmos.

O quarto capítulo, **Conclusões**, onde são apresentadas as conclusões finais relativas ao estudo realizado e onde são sugeridos trabalhos futuros relacionados com o tema da presente dissertação de mestrado.

São também apresentadas as referências bibliográficas que serviram de base para o estudo em questão e anexos relativos ao mesmo.

2. CARACTERIZAÇÃO DA LIGAÇÃO ENTRE CAMADAS E SEU EFEITO NO COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

2.1. Introdução

Neste capítulo proceder-se-á a uma revisão bibliográfica evidenciando a construção de um pavimento flexível em diferentes camadas, qual a importância de uma correcta ligação entre elas, a aplicação de grelhas de reforço pré-betuminadas antirreflexão de fendas e os factores que afectam a ligação entre camadas betuminosas.

Serão apresentados os métodos existentes mais correntes para avaliar a ligação entre camadas betuminosas de pavimentos flexíveis, bem como o procedimento de ensaio dos métodos que conduzem a melhores avaliações desta ligação entre camadas.

2.2. Importância da ligação entre camadas betuminosas

O pavimento é a parte da estrada construída para permitir a circulação do tráfego em determinadas condições de serviço e transmitir as solicitações dos rodados dos veículos à infraestrutura: terreno, obras de arte, entre outros (Miranda, 2015).

A função primária de um pavimento rodoviário é assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação de veículos com comodidade e segurança, durante o seu período de vida útil (Menezes, 2008).

Os pavimentos são estruturas estratificadas, compostas por um conjunto de camadas sobrepostas, aproximadamente horizontais e com alguns centímetros de espessura, constituídas por diversos materiais, adequadamente compactados, que permitam suportar a repetida aplicação de cargas transmitidas pela passagem dos veículos (Quaresma, 2014).

Estas diferentes camadas dispõem-se, normalmente com qualidade e resistência decrescentes, de cima para baixo, em consonância com a progressiva redução dos esforços em profundidade (Menezes, 2008).

Devido à evolução dos meios de transporte, as exigências em relação ao pavimento aumentaram, o que trouxe novos desenvolvimentos nas metodologias de dimensionamento, bem como nos materiais a aplicar.

Actualmente, os pavimentos flexíveis apresentam as camadas superiores formadas por misturas betuminosas, isto é materiais estabilizados com ligantes hidrocarbonados, geralmente o betume asfáltico, seguidas inferiormente de uma ou duas camadas constituídas por materiais granulares

(Menezes, 2008), assentes numa camada de fundação. As camadas granulares são camadas com agregados não ligados, britados, naturais ou reciclados, podendo ainda ser estabilizadas mecanicamente (Francisco, 2012).

A figura 2.1 apresenta, esquematicamente, a constituição típica de um pavimento flexível.

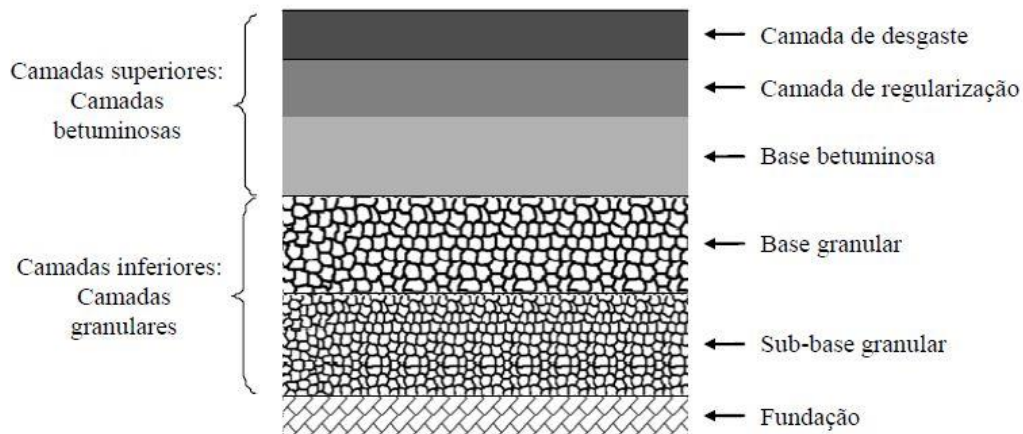


Figura 2.1 - Constituição tipo de um pavimento flexível (Silva, 2005)

As camadas superiores, camadas betuminosas (ligadas), são geralmente formadas por uma camada de desgaste, uma camada de regularização e uma camada de base. As camadas inferiores, camadas granulares (não ligadas), são geralmente formadas por uma camada de base granular e uma camada de sub-base granular. Ressalva-se que não é habitual a coexistência das bases betuminosas e granulares (Silva, 2005). Para tráfegos ligeiros a médios a camada de base é formada, em geral, por materiais granulares (britados ou não britados). Para tráfegos intensos são utilizados materiais incorporando ligantes betuminosos ou hidráulicos (Quaresma, 2014).

Segundo Silva (2005) e InIR (2009), na camada de desgaste colocam-se materiais incorporando ligantes betuminosos ou hidráulicos adequados para garantir a manutenção e as características superficiais pretendidas. A camada de desgaste tem a função de resistir à acção directa do tráfego e do clima, promovendo uma circulação com conforto e segurança, e distribui as tensões introduzidas pelo tráfego contribuindo para a resistência global da estrutura.

Quando a espessura total de camadas ligadas for elevada, ou quando se pretenda uma maior regularidade superficial, podem ser realizadas duas camadas superficiais, sendo a camada superior, designada de camada de desgaste e a camada inferior camada de regularização. A camada de regularização (ou de ligação) forma uma superfície mais regular (onde assentará a camada de desgaste) e também contribui para a resistência global da estrutura (Silva, 2005).

A camada de base betuminosa tem, essencialmente, uma função estrutural (InRI, 2009).

A camada de base granular assegura, essencialmente, um papel estrutural, distribuindo e reduzindo as tensões verticais, diminuindo as tensões de compressão na sub-base (Silva, 2005).

A camada de sub-base granular tem a função de diminuir as tensões de compressão na fundação (Silva, 2005), e assegura um apoio uniforme da camada de base. Permite que o solo de fundação seja capaz de suportar a circulação de obra, ao reduzir as tensões no solo de fundação e ao homogeneizar as características mecânicas da superfície de circulação em obra (Silva, 2005). Desempenha, por vezes, também uma função drenante e anticontaminante, evitando a subida de material fino do solo de fundação para a camada de base, que no caso de este ser de boa qualidade a camada de sub-base pode não existir. Para o caso de tráfegos ligeiros esta camada é geralmente formada por solos granulares seleccionados, e caso se trate de tráfegos intensos é formada por materiais granulares britados. Poderão ainda utilizar-se na camada de sub-base solos tratados com ligantes hidráulicos (por exemplo solo-cimento) (Quaresma, 2014).

Devido a um aumento da intensidade de tráfego, as camadas betuminosas têm aumentado a sua espessura, e hoje em dia, os pavimentos são constituídos preferencialmente por uma base betuminosa em detrimento da utilização de uma base granular (Silva, 2005).

O dimensionamento do pavimento visa definir a sua composição (número de camadas e tipo de materiais utilizados) de modo a evitar que, para o número de carregamentos previsto durante a vida do pavimento, as degradações ultrapassem certos limites considerados aceitáveis (Branco et al., 2011).

A construção de pavimentos em multicamadas garante a obtenção de adequados graus de compactação das misturas, mas, por outro lado, cria zonas de fragilidade na estrutura, nomeadamente na ligação entre camadas (Guimarães, 2013).

Caso uma interface considerada “colada” em fase de projeto passe a “descolada” durante o funcionamento do pavimento, podem ocorrer duas situações que contribuem para a evolução acelerada das degradações: as tensões máximas de tração na face inferior da última camada betuminosa “descolada” serem superiores às tensões admissíveis consideradas em projecto, e a camada de desgaste estar sujeita a esforços de tração para os quais não foi dimensionada. Neste caso o fendilhamento que se verifique à superfície da camada de desgaste, poderá ter a sua origem na própria camada de desgaste (Branco et al., 2011), conduzindo a uma degradação precoce do pavimento.

Tendo como base um conjunto de estudos apresentados por (Sutanto, 2009) pode notar-se que o facto de as camadas estarem desligadas leva a que o pavimento não funcione como um todo, afetando a sua resistência. Pela análise dos resultados apresentados por aquele autor pode concluir-se que a ausência de ligação entre camadas conduz a um aumento de tensões, deformações e

deflexões na zona inferior da camada superior “desligada”, verificando-se que em vez de apresentar uma degradação contínua das cargas a que está sujeito até à fundação, como seria de esperar para o comportamento estrutural de um elemento que funcionasse como um corpo único, o pavimento apresenta variações bruscas de tensões na passagem entre camadas. Esta situação demonstrou-se particularmente evidente na transição entre a camada de desgaste e a camada de regularização.

Verifica-se que associada à perda da capacidade de ligação entre as camadas há também uma redução do ciclo de vida dos pavimentos, cuja durabilidade atinge reduções da ordem de 75% do que seria expectável para o mesmo pavimento com as camadas ligadas (Sutanto, 2009). (Roffe e Chaignon 2002 citado em Vaitkus et al., 2012), afirma ainda que a vida útil de um pavimento betuminoso pode ser reduzida em 7 ou 8 anos devido a uma ligação entre camadas inadequada.

Conclui-se portanto, que o modo de funcionamento de um pavimento flexível está dependente, não só das características dos materiais de cada camada, mas também das respectivas condições de fronteira, ou seja das características das respectivas interfaces (Branco et al., 2011).

Para garantir uma correcta ligação entre camadas, na construção ou reabilitação de pavimentos, são geralmente aplicadas regas de colagem nas interfaces (Canestrari, et al., 2005). Para estas regas de colagem, podem ser usadas emulsões betuminosas ou, em casos mais raros, o próprio ligante betuminoso (Guimarães, 2013). Mediante a aplicação destas regas de colagem com ligantes betuminosos entre camadas, procura-se que as camadas betuminosas fiquem coladas umas às outras, funcionando então como uma camada única (Branco et al., 2011).

As emulsões betuminosas são os materiais mais utilizados para a rega de colagem (ou pintura de ligação), e estão representadas nos casos estudados nesta dissertação.

A rega de colagem deve ser aplicada após a limpeza da superfície, retirando o pó e o material solto, principalmente nos casos em que haja fresagem da camada. A emulsão betuminosa deve ser aplicada por meio de barra espalhadora, de um modo uniforme, e deve recorrer-se ao uso de “caneta” apenas nos casos de “falhas de bico”, onde não há cobertura total devido a falha pontual da barra espalhadora (Guimarães, 2013), conforme ilustrado na Figura 2.2.



Figura 2.2 - Aplicação de rega de colagem (Guimarães, 2013) a) por meio de barra espalhadora, b) por meio de caneta

Segundo a especificação de serviço do DNER-ES 307/97 a rega de colagem é a aplicação de ligante betuminoso sobre a superfície de base ou pavimento betuminoso anterior à execução de uma camada betuminosa qualquer, tendo como objectivo promover adequadas condições de aderência entre camadas.

A rega de colagem proporciona a aderência necessária entre camadas do pavimento, assegurando que elas atuem como um sistema monolítico, capaz de suportar as solicitações geradas pelo tráfego e pelo clima. Estudos demonstram que a eficiência da rega de colagem é fundamental na transferência de tensões de tração e corte ao conjunto do pavimento. Uma baixa aderência entre camadas, em casos extremos, é tipicamente associada a escorregamento da camada betuminosa por aceleração ou desaceleração do tráfego ou por manobras bruscas (Betunel, 2015).

Quando a aplicação da rega de colagem ocorre em quantidade insuficiente para garantir a correcta ligação entre as duas camadas betuminosas, surgem tensões de tracção elevadas na fibra inferior da camada sobrejacente, produzindo um fendilhamento precoce da mesma. Em contrapartida, o excesso de rega de colagem, para além de antieconómico, pode causar um escorregamento entre camadas que, por implicar que a camada superior seja solicitada como não ligada, também provoca o surgimento de tensões de tracção na fibra inferior da camada sobrejacente levando ao fendilhamento precoce dessa camada (Guimarães, 2013).

A quantidade óptima de rega de colagem varia consoante os materiais e os processos construtivos do pavimento em análise, como se pode constatar nos estudos levados a cabo por Sutradhar (2012) e por Plug e Bondt (2010) (Figura 2.3).

Plug e Bondt (2010) nos seus estudos sob pavimentos não sujeitos à ação do tráfego, utilizando como material de rega de colagem uma emulsão betuminosa corrente (tipo A) e uma emulsão betuminosa modificada com polímeros (tipo D) com taxas de aplicação diferentes, concluíram que a resistência a tensões de corte na interface da ligação entre camadas aumentava durante o período de cura, que as emulsões betuminosas modificadas com polímeros conduziam a um melhor desempenho na fase após a construção do pavimento, e que esta melhoria se verificava ao longo do tempo.

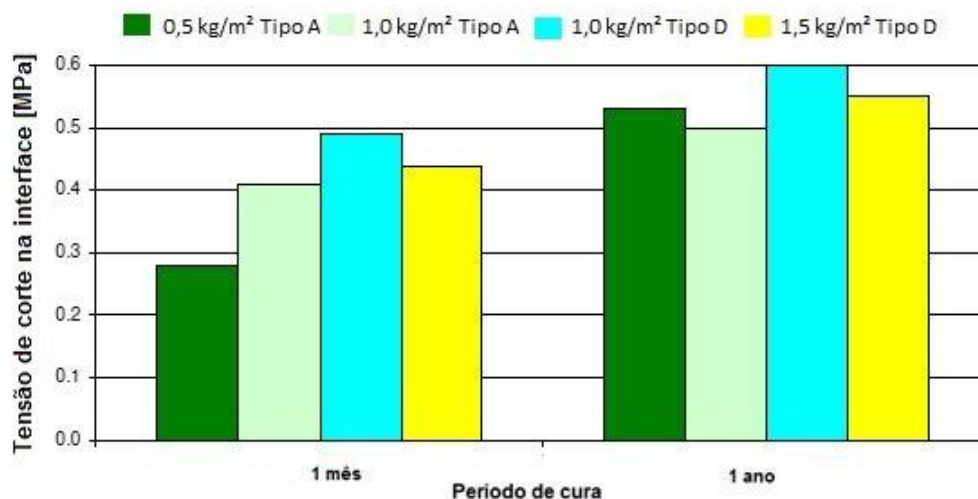


Figura 2.3 - Variação da tensão de corte na interface com o período de cura, adaptado de Plug & Bondt, (2010)

Conclui-se assim, que a rega de colagem, pequeno detalhe em termos do custo global de construção ou reabilitação de um pavimento, é uma componente importante para a sua qualidade (Betunel, 2015).

Os esforços produzidos pela passagem de um veículo vão provocando progressivas alterações dos materiais constituintes do pavimento, as quais vão determinando a redução da sua qualidade, traduzida por determinadas degradações. Estas, nos casos mais correntes, consistem sobretudo na ocorrência de fendilhamento das camadas com coesão, devido a um processo de rotura por fadiga associada à repetição das extensões de tração nelas instaladas, e na ocorrência de deformações permanentes (assentamentos) na superfície do pavimento, traduzindo o adensamento das várias camadas e do solo de fundação, associado à repetição das extensões verticais de compressão nessas camadas (Branco et al., 2011).

Em condições de serviço, a interface de ligação entre camadas é solicitada tanto por forças de corte como por forças de tração aquando da passagem dos veículos, como explicitado na Figura 2.4.

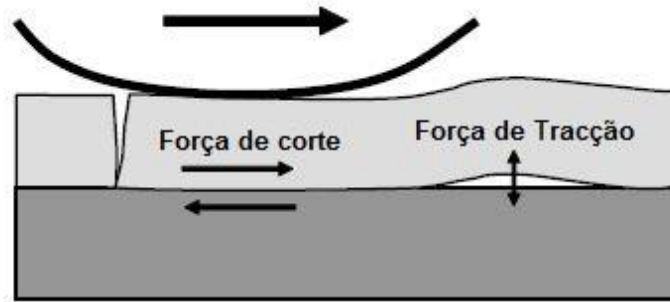


Figura 2.4 - Forças geradas na interface das camadas de pavimentos betuminosos com a passagem de veículos, adaptado de Raab & Partl, (2004)

Ressalva-se a importância da realização de ensaios de tracção devido ao facto de que em serviço a adesão das camadas betuminosas não é apenas solicitada por forças de corte, mas também por forças de tracção.

Os projetos de pavimentos, sejam relativos a secções novas ou de reabilitação, não contemplam a possibilidade de redução da aderência entre camadas (Raab & Partl, 2004).

As estratégias de manutenção dos pavimentos são muitas vezes baseadas nas características de superfície e fenómenos de deterioração, não tendo em conta a determinação da adesão entre camadas (Raab & Partl, 2004).

Segundo os seguintes autores citados por Vaitkus et al. (2012), uma fraca ligação entre camadas betuminosas de pavimentos flexíveis pode causar fissuras (R. Weber), e, ondulações e depressões no pavimento (K. Schulze).

Devido a uma insuficiente ligação entre camadas betuminosas, a camada de desgaste pode deslocar-se paralelamente à camada de regularização, devido a forças de corte geradas pela passagem do tráfego, e por sua vez a camada de regularização deslocar-se paralelamente à camada de base. Neste caso, toda a estrutura do pavimento é afectada, gerando-se ondulações, escorregamento e fissuras transversais (Vaitkus et al., 2012).

A análise de falhas de ligação entre camadas betuminosas relatadas em pavimentos rodoviários existentes levada a cabo por (Sutanto, 2009), permitiu-lhe concluir que estas ocorrem geralmente na ligação entre a camada de desgaste e a camada de regularização. Estas falhas de ligação verificavam-se principalmente nas zonas onde as forças horizontais, resultantes de arranques, travagens e mudanças de direcção, eram elevadas, tendo como evidencia visual mais comum fissuras no pavimento e/ou deformações horizontais permanentes (Figura 2.5), o que demonstra que a fraca ligação entre camadas pode afectar significativamente as condições de serviço do pavimento.



Figura 2.5 - Degradação do pavimento devido a falhas na ligação entre camadas betuminosas, PavInt (2015)

Na reabilitação de pavimentos, em locais com elevado grau de fendilhamento, é comum a aplicação de sistemas de antirreflexão de fendas na interface entre as camadas existentes e a camada nova. Estes sistemas de reforço têm como objectivo final o aumento da vida útil e a redução dos custos de manutenção, e podem ser de vários materiais, nomeadamente, geotêxteis impregnados em ligantes betuminosos, geogrelhas (produzidas com material polimérico), grelhas de fibra de vidro ou de fibras de carbono, grelhas metálicas, entre outros.

Assim, dentro das técnicas disponíveis refere-se a aplicação de grelhas de reforço na reabilitação de pavimentos, tendo como objectivo a limitação da propagação de fendas, sendo que, quer pela sua adequação aos mecanismos de rotura apresentados pelo pavimento, quer pela facilidade com que pode ser aplicada em obra, esta técnica constitui uma das respostas mais correntes às situações em que é necessária a reabilitação de pavimentos (Marcelino et al., 2013).

Estas grelhas podem ser de fibra de vidro ou de fibra de carbono. Ambas possuem a função de impedir a passagem das fendas das camadas existentes fendilhadas para as camadas novas, sendo que as grelhas de fibra de carbono possuem ainda a função adicional de reforço mecânico do pavimento.

As grelhas de fibra de vidro possuem fibras de vidro nas duas direções, como se apresenta na Figura 2.6, e as grelhas de fibra de carbono longitudinalmente são compostas por fibras de carbono e na direção transversal por fibras de vidro, apresentado na Figura 2.7.

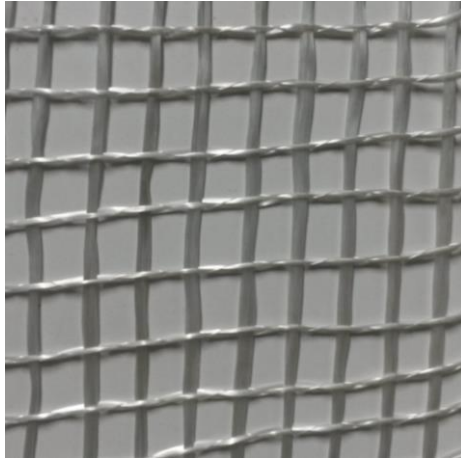


Figura 2.6 - Grelha de fibra de vidro

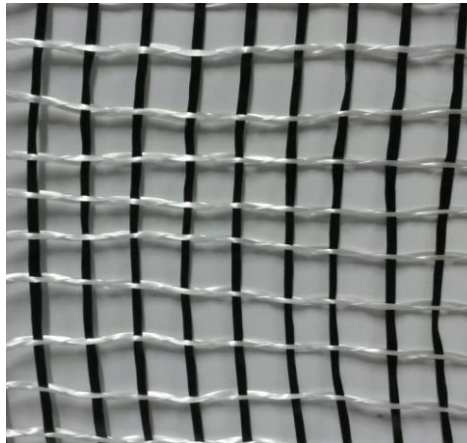


Figura 2.7 - Grelha de fibra de carbono

Ambas são pré-betuminadas em fábrica para garantir uma melhor aderência às camadas onde serão aplicadas. Na Figura 2.8 apresenta-se o aspecto das grelhas pré-betuminadas, em fibra de vidro ou fibra de carbono, prontas a aplicar em obra.

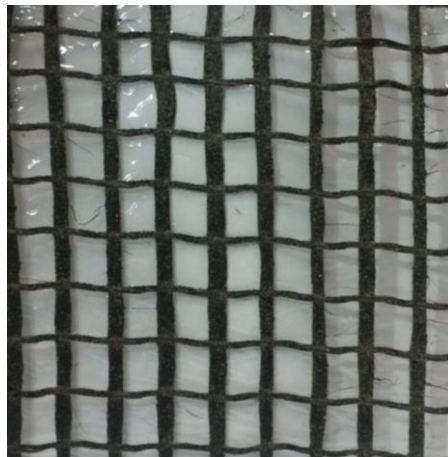


Figura 2.8 - Aspecto das grelhas em fibra de vidro ou fibra de carbono prontas a aplicar em obra

A aplicação da grelha é feita através do seu desenrolamento, com auxílio mecânico, podendo ainda ser aplicada manualmente. Em geral, as grelhas de fibra de vidro e de fibra de carbono são revestidas com uma folha plástica na parte inferior, para controlo de aplicação, que é fundida por queima, e na parte superior possui um revestimento com cargas de quartzo. O efeito do calor durante a aplicação quebra a estrutura da grelha, e o betume que fixa os cordões de fibra é então amolecido, favorecendo a sua aplicação. As fibras sem ligações rígidas nos nós são adaptáveis, sendo assim possível a sua aplicação em troços curvos (Scherer, 2007).

Para permitir a aplicação de camadas de desgaste sobre a grelha de reforço, mesmo a altas temperaturas durante o período de verão, é requerida uma emulsão betuminosa modificada, cuja temperatura mínima de amolecimento deve ser superior a 70°C. Se fosse aplicada uma emulsão betuminosa tradicional, o risco da grelha ser removida em resultado do amolecimento da emulsão poderia ser potenciado aquando da passagem dos veículos durante a aplicação da mistura betuminosa, levando a uma falha de aderência entre camadas (Scherer, 2007).

De um modo geral, a ligação entre camadas com grelha de reforço torna-se eficaz devido a durante a aplicação da camada superior a estrutura da grelha ser quebrada devido ao efeito do calor. Os cordões da fibra abrem localmente nos nós permitindo que os agregados da mistura betuminosa quente penetrem durante a compactação, garantindo assim a fixação mecânica do novo pavimento com o existente através da grelha. Para os casos de reabilitação, em que o pavimento é fresado antes da colocação da camada superior, é expectável uma melhoria da penetração mecânica dos agregados, conduzindo a uma melhoria da força de aderência entre camadas. Os cordões da fibra ficam dispostos num arranjo ligeiramente ondulado após endurecimento. Este fenómeno induz forças de deflexão, resultando numa ligação mais eficaz da fibra na nova camada, garantindo-se assim a aderência ao corte (Scherer, 2007).

2.3. Factores que afectam a ligação entre camadas betuminosas

Tendo em conta a importância da ligação entre camadas para o correcto desempenho dos pavimentos e para a sua durabilidade, carece de especial importância a identificação e caracterização dos fatores que influenciam a qualidade da ligação entre camadas.

Vaitkus et al. (2012) concluíram no seu estudo, que a mistura betuminosa tinha influência na ligação entre camadas betuminosas através da influência do tamanho dos agregados utilizados na mistura betuminosa, pelo tipo de mistura betuminosa e pela emulsão betuminosa aplicada. Esta situação também se verifica nos ensaios levados a cabo por Raab e Partl (2004).

Em vários casos, problemas com a ligação entre camadas betuminosas são resultado do processo construtivo, tais como aplicação de energia de compactação insuficiente, compactação de camadas muito espessas, eventualmente com equipamento de compactação com características inadequadas,

condições atmosféricas condicionantes do processo construtivo como temperatura e precipitação, e superfície da camada inferior suja (Raab & Partl, 2004).

Uma boa compactação da camada superior garante maior resistência ao corte na interface, o que configura numa melhor aderência entre camadas (Chen e Huang, 2010).

As acções climáticas, expressas pela temperatura e pela presença de água, têm uma influência relevante no comportamento e evolução das características dos pavimentos, em particular naqueles que apresentam uma componente betuminosa significativa e também uma elevada componente granular. A rigidez das camadas betuminosas varia no sentido inverso da temperatura, e a resistência das camadas granulares e do solo de fundação reduz à medida que o teor em água aumenta (Branco et al., 2011).

A rega de colagem, quando presente, influencia a ligação entre camadas betuminosas através do seu tipo, quantidade (taxa de aplicação) e modo de aplicação. Uma reduzida taxa de aplicação de rega de colagem está, usualmente, associada a uma baixa aderência da interface de ligação entre camadas. Por oposição, o excesso de aplicação de rega cria um filme espesso e deformável (Chen e Huang, 2010), que reduz o atrito, pois cria uma superfície de deslizamento que não permite o contacto entre camadas contíguas (Vaitkus et al., 2012).

Contudo, a perda de aderência pela rega de colagem pode ainda ser causada por excesso de diluição da emulsão betuminosa e pelo fato da sua aplicação ter sido realizada sobre superfície com limpeza deficiente (excesso de poeira ou outros contaminantes) (Betunel, 2015).

Além dos cuidados com as taxas de aplicação a serem adotadas e o respetivo processo construtivo, é importante conhecer também os cuidados com o ligante a ser empregado, tais como (Betunel, 2015):

- Diluição correcta da emulsão com água isenta de contaminantes;
- Diluição e aquecimento da emulsão, sendo que esta última ação é geralmente utilizada, resultando na quebra do equilíbrio do produto, tornando-o pouco estável e muito propenso ao rompimento prematuro. Por isso, a aplicação deve ser imediata, pois o produto não resiste por muito tempo nessas condições;
- Quantidade diluída deve ser aplicada no dia;

A aplicação da rega de colagem deve ser cuidada e distribuída de maneira uniforme por toda a superfície do pavimento, para que todas as zonas apresentem a mesma quantidade de material. Na Figura 2.9 apresentam-se dois casos de uma correcta aplicação da rega de colagem e de uma aplicação deficiente.



Figura 2.9 - Aplicação de rega de colagem, adaptado de Lancaster (2009) a) aplicação cuidada da rega de colagem, b) aplicação deficiente da rega de colagem

Quando se verificam gradientes térmicos significativos entre a superfície e o interior do pavimento, assim como a passagem dos rodados dos veículos sobre os pavimentos, em especial em zonas de arranque, de travagem ou de curvas, pode levar ao desenvolvimento de campos de tensões/deformações que conduzem à rotura da ligação existente entre as camadas (Marcelino et al., 2013). Este desligamento das camadas, provoca fissuras no pavimento que por sua vez permitem a entrada de água para as camadas subjacentes, o que propaga os danos para toda a estrutura do pavimento (Sutanto, 2009).

Segundo o estudo levado a cabo por Raab e Partl (2004), a presença de água tem um efeito negativo na ligação entre camadas, provocando uma diminuição da resistência ao corte entre 15% a 27% quando comparada com amostras cuja interface não esteve em contacto com a presença de água.

Em termos de ensaios laboratoriais, a taxa de deslocamento aplicada e a temperatura de ensaio influenciam a ligação entre as camadas. Devido à natureza viscoelástica da emulsão betuminosa, a aplicação de maiores taxas de deslocamento conduzem a uma carga de rotura maior. Quanto à temperatura, à medida que esta aumenta, a ligação entre as camadas diminui, devido a uma redução da rigidez do material (Sutradhar, 2012). Num estudo conduzido por West et al. (2005) (citado em Sutradhar, 2012) concluiu-se que a ligação entre camadas é 2,3 vezes melhor a uma temperatura de 10° C quando comparado com temperatura de 25° C, enquanto que a ligação entre camadas é 1/6 vezes menor a 60° C quando comparada com a mesma temperatura de referencia de 25° C. Tendo em consideração o apresentado, todos os ensaios realizados neste estudo foram executados à mesma temperatura de 20° C, de maneira a que o valor da temperatura não condicionasse os resultados obtidos, permitindo assim uma análise comparativa dos mesmos.

Em suma, os factores que afectam a ligação entre camadas betuminosas a considerar são a mistura betuminosa (tamanho dos agregados, tipo de mistura e emulsão utilizada) (Vaitkus et al., 2012), as condições de construção do pavimento (problemas na compactação, limpeza da camada inferior da

interface e existência de água), o controlo da rega de colagem (na quantidade, tipo e modo de aplicação), as acções a que o pavimento está sujeito (temperatura e tráfego) e a existência ou não de elementos de reforço.

2.4. Principais métodos para avaliar a ligação entre camadas betuminosas

2.4.1. Introdução

Dada a importância da ligação entre as camadas dos pavimentos, torna-se de extrema relevância esta avaliação tanto nos pavimentos recém-construídos como nos existentes ou alvo de reabilitação.

Segundo (Vaitkus et al., 2012) a ligação entre camadas betuminosas pode dividir-se em três tipos:

- Suficientemente ligadas – as camadas betuminosas agem como um todo, formando uma estrutura monolítica. Caracteriza-se por solicitar uma grande força de corte sem apresentar deslocamentos. Contudo, este é um modelo teórico, pois na prática verifica-se que a interface entre camadas betuminosas é sempre representada por deformações, que podem ser elevadas ou não.
- Parcialmente ligadas – depende da força do atrito entre camadas. Verificam-se forças e deslocamentos de várias gamas. No caso de uma forte adesão entre camadas betuminosas verifica-se uma elevada força de corte e deslocamentos baixos, no caso de uma fraca adesão entre camadas a força de corte registada é baixa e os deslocamentos são elevados.
- Ligação insuficiente – quando a ligação apenas depende do peso próprio das camadas. Neste caso verificam-se pequenas forças de corte e elevadas deformações na interface das camadas betuminosas.

Nos últimos anos, vários países têm desenvolvido métodos de ensaio e equipamentos para avaliar a ligação entre camadas de pavimentos. Apesar disso, *nenhum* método ou procedimento de ensaio foi reconhecido internacionalmente (RILEM, 2012).

Tendo em conta esta falta de normalização internacional, está a ser desenvolvido, a nível europeu, o projecto de norma prEN 12697-48 “Misturas Betuminosas – Métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente – Parte 48: Ligação entre camadas”. Este projecto de norma especifica vários métodos de ensaio para determinar a resistência da ligação entre camadas betuminosas, recém construídas ou existentes, de pavimentos rodoviários e aeroportuários.

Para avaliar as propriedades mecânicas da interface de camadas betuminosas, existem dois tipos de métodos de ensaio reconhecidos pela comunidade científica, os destrutivos e os não destrutivos. Os métodos destrutivos são realizados em amostras retiradas *in situ* ou fabricadas em laboratório, sendo

que após o ensaio as amostras ficam destruídas não sendo possível repeti-los. Os métodos não destrutivos são geralmente realizados *in situ* no pavimento existente, sem impacto sobre a estrutura do pavimento.

Os métodos não destrutivos geralmente baseiam-se na propagação de ondas de frequências superiores a 20 Hz na estrutura do pavimento. Os procedimentos de ensaio variam consoante o método utilizado, sendo que os mais comuns são o *Portable Seismic Pavement Analyser* (PSPA), o *Colibri Test*, o *Hammer Test* e o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) (RILEM, 2012). Estes métodos têm a grande vantagem de não causarem danos na estrutura do pavimento. Contudo, é de notar que excluindo a nova retro análise desenvolvida por Hakim (1997) (citado em Sutanto, 2009) para o Deflectómetro de Impacto (FWD), os métodos não destrutivos apenas são capazes de detetar falhas na ligação entre camadas e não o estado de ligação entre as mesmas. Esta nova retro análise mesmo apresentando-se como o método não destrutivo mais útil possui algumas limitações, como sendo, para pavimentos cuja informação sobre a construção não está disponível a recolha de amostras do pavimento torna-se necessária para determinar os parâmetros a utilizar na retro-análise; dado que esta análise é sensível à espessura da camada, a introdução de uma espessura imprecisa da camada conduziria a resultados errados; e este teste não é adequado para determinar o estado de ligação de camadas mais superficiais.

Nos métodos destrutivos, os provetes são levados à rotura, com aplicação de carga ou de deslocamento constante, dependendo do dispositivo de ensaio utilizado. Este tipo de ensaios apresentam alguns inconvenientes devido ao facto de implicarem a recolha de amostras em campo, como sendo o facto de destruírem uma parte do pavimento existente, são ensaios morosos e podem causar perturbações no tráfego durante a sua realização *in situ* ou durante a recolha das amostras (RILEM, 2012). Contudo, possuem a grande vantagem de permitirem avaliar o estado de ligação entre as camadas dos pavimentos, com a obtenção de parâmetros.

Em RILEM (2012) os métodos destrutivos são agrupados em quatro categorias, com base na configuração do ensaio ou da carga a aplicar para obter a rotura do provete de ensaio, apresentando-se na Figura 2.10, esquematicamente a forma de aplicação das cargas:

- Ensaio de corte (com ou sem carga normal);
- Ensaio de tração (método de *Pull-off*);
- Ensaio de torque;
- Ensaio de separação de camadas com recurso a cunhas (*wedge splitting test*);

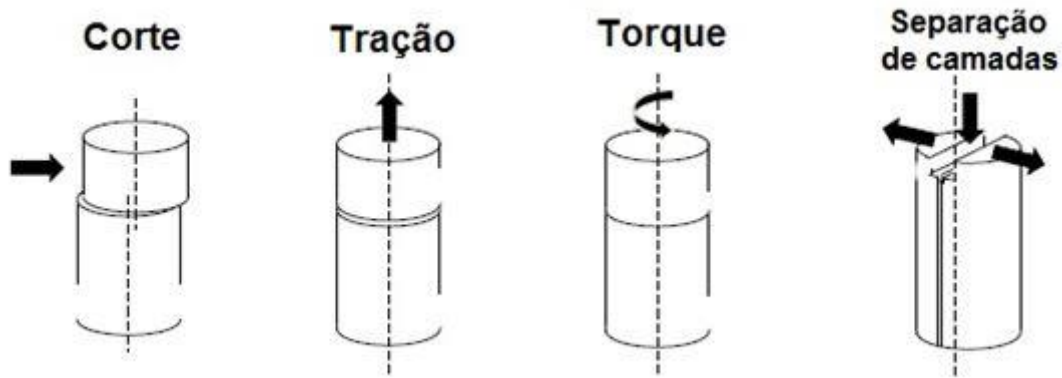


Figura 2.10 - Métodos destrutivos de análise da ligação entre camadas, adaptado de RILEM (2012)

O método de separação entre camadas possui duas fortes desvantagens, como sendo que a distribuição de tensões a que os provetes de ensaio estão sujeitos não é representativa das condições em que ocorre a falha na ligação entre camadas dos pavimentos em serviço, e que, devido à configuração dos provetes de ensaio não ser comum, a sua preparação laboratorial requer atenções adicionais (RILEM, 2012). Como tal, este método não é usual para a avaliação da ligação entre camadas betuminosas e não será abordado no presente estudo experimental.

Apresentam-se na Figura 2.11 os métodos destrutivos de análise da ligação entre camadas betuminosas mais comuns, bem como as condições de carga a que os provetes ensaiados estão sujeitos.

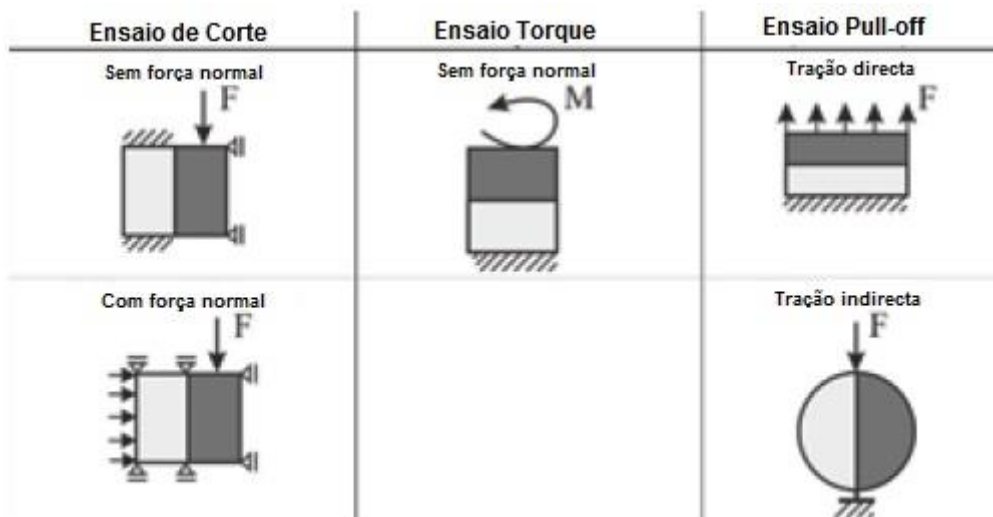


Figura 2.11 - Carregamento aplicado nos métodos destrutivos mais comuns para avaliação da ligação entre camadas betuminosas, adaptado de Vaitkus (2012)

O ensaio de tração indirecta, embora seja possível de ser utilizado para avaliar a ligação entre camadas betuminosas de pavimentos, contém algumas limitações relevantes, como sendo a

preparação do provete de ensaio requer muito esforço devido à sua configuração não ser usual, o provete tem de ser extraído de uma tal maneira que a interface de estudo esteja no centro do diâmetro e como tal este método não pode ser utilizado para camadas pouco espessas. Este ensaio, apenas mede as propriedades da ligação à tração, não avaliando o efeito do imbricamento devido aos agregados na interface de estudo, e é considerado como apresentando uma elevada dispersão de resultados. Tem-se ainda que, devido à configuração do provete de ensaio, este não pode ser realizado *in situ* (Sutanto, 2009).

Relatos de falhas de adesão entre camadas betuminosas têm sido amplamente observados por inúmeros investigadores, sendo que separações por corte, por tração e por um misto de corte e tração, são mecanismos utilizados para caracterizar estas falhas de ligação. Apesar destes modos de separação entre camadas se verificar em pavimentos, verifica-se que a separação entre camadas devido a forças de corte são as que mais ocorrem (Sutanto, 2009).

O método mais usado para a avaliação da ligação entre camadas betuminosas é, portanto, o Ensaio de corte (*Shearing Test*), que pode ser realizado sem força normal sendo designado por Ensaio de corte directo (*Direct Shear Test*), ou com força normal sendo designado por Ensaio de corte simples (*Simple Shear Test*) (Vaitkus, 2012).

O ensaio de corte com força normal é considerado mais adequado para uma investigação mais detalhada, pois pode ser usado para avaliar o efeito da carga normal à superfície e o efeito da dilatância. Contudo, a aplicação de uma carga normal requer uma configuração do ensaio muito mais complicada, tornando-se difícil ser aceite como um ensaio padrão para avaliação da ligação entre camadas betuminosas (Sutanto, 2009).

O ensaio de *Leutner* é o método de corte directo mais utilizado. Na Suíça, Áustria e Alemanha é o ensaio padrão para avaliar a ligação entre camadas betuminosas. A ligação entre camadas é avaliada através da medição da força de corte máxima (kN) e do deslocamento (mm) (Vaitkus, 2012).

Nesta dissertação serão apresentados os três métodos destrutivos preconizados no projeto de norma prEN 12697-48, contudo o estudo experimental desenvolvido e apresentado centrar-se-á no ensaio de corte pelo método de *Leutner* modificado e no ensaio de tração pelo método *Pull-off*, com maior incidência no ensaio de corte *Leutner*.

2.4.2. Shear bond test (Ensaio de *Leutner* modificado)

Actualmente, os testes laboratoriais mais utilizados para avaliar as condições de ligação entre camadas betuminosas são os métodos de corte directo, sendo que o método mais comum para avaliar a ligação entre camadas betuminosas por corte é o *shear bond test* designado por ensaio de *Leutner* modificado (RILEM, 2012).

O ensaio de *Leutner* foi desenvolvido na Alemanha nos anos 70 como um ensaio de corte para testar a adesão entre duas camadas betuminosas de um pavimento. O princípio do ensaio consiste na aplicação de uma força de corte, a uma taxa constante e com temperatura controlada, na interface de duas camadas contíguas em provetes cilíndricos de 100 mm ou 150 mm de diâmetro (Plug e De Bondt, 2010). A força de corte máxima registada é considerada como a resistência ao corte da interface em estudo.

O equipamento usado no ensaio de *Leutner* é composto por um dispositivo metálico que possibilita a aplicação de uma tensão de corte nos provetes cilíndricos em ensaio. Este dispositivo é constituído por um corpo principal, bipartido, estando na parte inferior fixado o sistema de suporte dos provetes cilíndricos, bem como a metade do anel que aplica a tensão de corte. A metade superior do anel está ligada à metade superior do corpo principal, que apresenta movimento vertical livre (Marcelino, et al., 2013).

Apesar dos princípios do ensaio de *Leutner* não terem sofrido alterações desde a sua origem, surge em 2005 o ensaio de *Leutner* modificado, com o objectivo de resolver alguns problemas de esmagamento das partículas do agregado na zona de interface das camadas, e decorrentes da dificuldade no alinhamento da interface com o anel de movimento vertical libertado que exerce a força de corte no provete e a impossibilidade de ensaiar pavimentos com camadas ligadas de reduzida espessura. Desta forma, o ensaio de *Leutner* modificado difere do original por introduzir um espaçamento de 5 mm na zona de interface, prevendo a utilização de um acessório metálico especial para os provetes com camadas finas (Marcelino, et al., 2013).

Actualmente, não existe uma norma europeia para o ensaio de *Leutner*, pelo que no presente estudo se segue a metodologia proposta no *Appendix A.1 do Manual of Contract for Highway Works* (2008). Anota-se, contudo, que está em preparação pelo European Committee for Standardization CEN/TC 227 o projecto de norma prEN 12697-48, que define este método de ensaio de maneira muito semelhante à metodologia actualmente seguida proposta no manual supracitado.

Como principais diferenças referem-se: no preconizado no *Appendix A.1 do Manual of Contract for Highway Works* (2008) o aparelho de ensaio *Leutner* deve ser capaz de atingir uma carga máxima vertical de pelo menos 50 kN, enquanto que o projeto de norma prEN 12697-48 requer uma força máxima de carga vertical maior que 35 kN; no *Appendix A.1 do Manual of Contract for Highway Works* (2008) prevê a realização de ensaios sobre cinco provetes para a obtenção e um resultado, enquanto que o projeto de norma refere um mínimo de dois provetes para ensaio; o *Appendix A.1 do Manual of Contract for Highway Works* (2008) prevê que os provetes sejam condicionados a temperatura controlada de $20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ por um período mínimo de 5 horas, enquanto que o projecto de norma prevê que os provetes sejam condicionados a temperatura controlada de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ por um período mínimo de 4 horas; e finalmente, segundo o *Appendix A.1 do Manual of Contract for*

Highway Works (2008) o ensaio termina quando a máquina de compressão atinge o seu deslocamento limite de 7 mm, enquanto que pelo projecto de norma prEN 12697-48 o ensaio termina a máquina de compressão atinge o seu deslocamento limite ou quando o gráfico da força de corte atinge o seu valor máximo.

De acordo com o proposto no *Appendix A.1 do Manual of Contract for Highway Works* (2008) as especificações e o procedimento de ensaio para o ensaio de *Leutner* modificado são os seguintes:

1. O diâmetro e a espessura do provete devem ser determinados em milímetros;
2. O provete deve ser condicionado a temperatura controlada de $20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ por um período mínimo de 5 horas;
3. O anel de corte apropriado, para formar um ajuste com folga em torno do provete (por exemplo um diâmetro para o anel de 151 mm para um provete de 150 mm), deve ser seleccionado e montado no aparelho de *Leutner*;
4. O provete deve ser colocado no aparelho de *Leutner* com a interface entre camadas alinhada (indicado pela letra G na figura 2.12), entre o anel de corte superior e o anel de corte inferior (letra C e D, respectivamente, na figura 2.12);
5. Apertar o suporte do provete com uma chave adequada;
6. O aparelho de ensaio *Leutner* deve ser colocado na máquina de compressão e ajustado até que o anel superior (C) quase toque no provete;
7. Iniciar o registo de dados (carga e deslocamento) e aplicar a força de corte. A taxa de carregamento do ensaio deve ser de $50,0 \pm 2$ mm por minuto;
8. Registar a carga (F) com a precisão de 0,1 kN e o deslocamento (δ) com a precisão de 0,1 mm;
9. O ensaio termina quando a máquina de compressão atinge o seu deslocamento limite de 7 mm. O intervalo de tempo desde que o provete é retirado de temperatura controlada até ao ensaio terminar não deve exceder 15 minutos;
10. Depois de terminado o teste, o aparelho de ensaio deve ser desmontado e o provete removido;
11. Ambas as partes do provete devem ser observadas (principalmente a interface entre camadas) para avaliar a presença de fendas e aparência incomum (agregados esmagados nas bordas). Registar quaisquer comentários caso necessário.

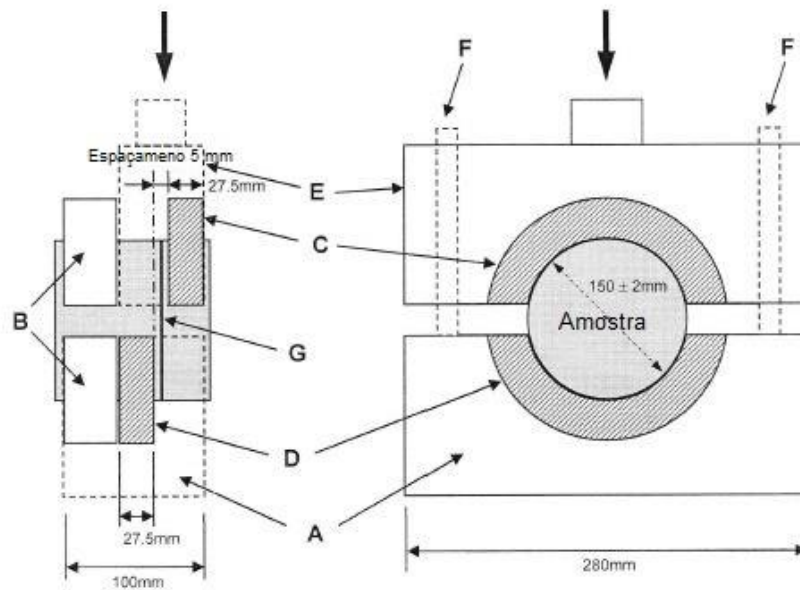


Figura 2.12 - Esquema dispositivo *Leutner* modificado, adaptado de *Manual of Contract for Highway Works* (2008)

Em que:

- A – Estrutura inferior do dispositivo de *Leutner*
- B – Base de suporte da amostra
- C – Anel de corte superior
- D – Anel de corte inferior
- E – Estrutura superior do dispositivo de *Leutner*
- F – Barra de guia
- G – Interface entre camadas da amostra

Como resultados do ensaio são registados os valores da força máxima de corte por provete, bem como o seu deslocamento associado. Através da equação 2.1 obtém-se a tensão máxima de corte pelo método de *Leutner* modificado.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{\pi \times r^2} \times 10^3 \quad (2.1)$$

Em que:

- $\sigma_{m\acute{a}x}$ – Tensão máxima de corte na interface entre camadas [MPa];
- $F_{m\acute{a}x}$ – Força de corte máxima na interface entre camadas [kN];
- r – Raio do provete [mm];

Neste ensaio é possível obter o módulo de reacção ao corte (K), através da equação 2.2

$$K = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\delta_{m\acute{a}x}} \quad (2.2)$$

Em que:

- K – Módulo de rigidez de corte [MPa/mm];
- $\sigma_{m\acute{a}x}$ – Tensão máxima de corte na interface entre camadas [MPa];

$\delta_{m\acute{a}x}$ – Deslocamento aquando da rotura por corte na interface entre camadas [mm];

Conforme supracitado, o *Appendix A.1 do Manual of Contract for Highway Works (2008)* preconiza a realização de ensaios sobre cinco provetes para obtenção de um resultado, contudo, o projeto de norma prEN 12697-48 indica que devem ser testados no mínimo dois provetes retirados do pavimento em estudo.

Uma grande vantagem do método de *Leutner*, e que faz com que seja usado em vários países, é o facto do dispositivo de ensaio ser bastante simples e de se conseguir estudar a ligação entre camadas do pavimento de uma forma relativamente fácil e rápida. O aparelho de ensaio encaixa-se numa máquina de ensaios de compressão comum, e permite ensaiar provetes retirados de um pavimento existente ou produzidos em laboratório (RILEM, 2012). A preparação dos provetes de ensaio é simples pois não requer nenhuma espécie de colagem, utiliza provetes que são muito comuns de retirar do pavimento existente ou de lajes fabricadas em laboratório para outro tipo de avaliações ao mesmo, a força de corte é aplicada num plano pré-definido garantindo que o corte ocorre na interface e não na própria camada, e é tido como um método que apresenta resultados com muito boa precisão, para além de ser um método utilizado e referenciado em normas de países como Alemanha, Áustria e Suíça (Sutanto, 2009).

No entanto, também existem algumas limitações neste ensaio, nomeadamente, o facto de não existir uma carga aplicada perpendicularmente à interface para simular as condições de tráfego e a carga de corte poder ter uma excentricidade que causa um momento adicional (RILEM, 2012).

Actualmente, o valor mínimo para a força de corte entre camadas não está regulamentada a nível nacional, não existindo nos Cadernos de Encargos referência a esta característica. Espera-se que com o aparecimento da norma de ensaio europeia e com a disponibilização de métodos de ensaio para avaliação das características de aderência entre camadas seja possível definir valores de referência para aquela característica.

Alguns autores têm vindo a propor valores mínimos a serem cumpridos no que respeita à força de corte entre camadas. Sutanto (2009) propõe para os pavimentos do Reino Unido que a tensão de corte na interface entre a camada de desgaste e a camada de regularização seja pelo menos 1 MPa, e para a interface entre a camada de regularização e a camada de base de pelo menos 0,5 MPa.

A norma Suíça SN 640430 define como valor mínimo para força da ligação entre a camada de desgaste e a camada de regularização 15 kN, e para as restantes camadas de base 12 kN.

A norma Alemã ZTV Asphalt – StB 07, (citada por Vaitkus et al., 2012), preconiza como valor mínimo para a ligação entre a camada de desgaste e a camada de regularização 15 kN, e para a ligação entre as restantes camadas de base, um valor mínimo de 12 kN, à semelhança do exigido na norma

Suíça. Esta norma define ainda que o deslocamento obtido para a força máxima de corte entre a camada de desgaste e a camada de regularização deve estar compreendido entre 2,0 mm a 4,0 mm, e que o deslocamento obtido para a força máxima de corte das restantes camadas de base deve estar compreendido entre 1,5 mm a 3,0 mm.

2.4.3. Tensile Bond Test (Ensaio de *Pull-off*)

O *tensile bond test* ou ensaio de *Pull-off* é um método muito corrente para determinar a força de tração entre camadas. Na Áustria é utilizado como um ensaio padrão, e no Reino Unido é utilizado como ensaio padrão para pavimentos rígidos (Sutanto, 2009).

Este ensaio pode ser realizado em provetes cilíndricos recolhidos do pavimento betuminoso em análise, ou pode ser realizado no próprio pavimento, *in situ* ou em lajes recolhidas e transportadas para laboratório.

Para o caso em que sejam recolhidas carotes do pavimento, o ensaio é realizado por meio de um dispositivo de *Pull-off* de acordo com a figura 2.13, em que, placas metálicas são coladas no topo e na base do provete, sendo então este conjunto levado à máquina de tração que puxa na direcção axial até à rotura. Com este ensaio laboratorial podem determinar-se as propriedades à tração da ligação entre camadas do pavimento.

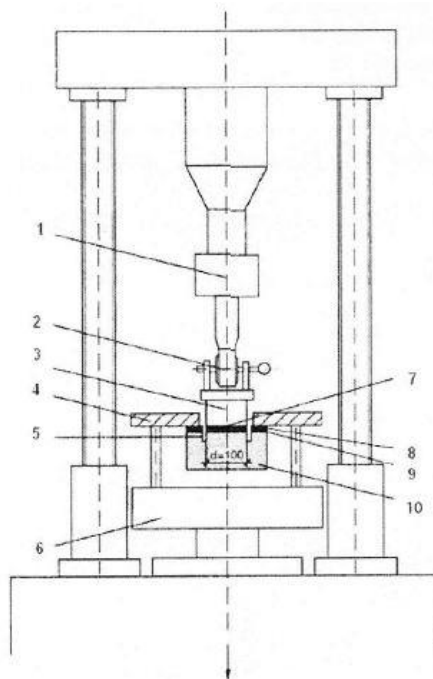


Figura 2.13 - Dispositivo de ensaio *Pull-off*, prEN 12697-48

Em que:

1 – Célula de carga

- 2 – Junta
- 3 – Pastilha metálica
- 4 – Contra-placa
- 5 – Sulco no pavimento (caroteamento parcial do pavimento)
- 6 – Suporte
- 7 – Cola
- 8 – Camada betuminosa superior
- 9 – Interface de estudo
- 10 – Camada betuminosa inferior

Este tipo de ensaio está também preconizado no projecto de norma pr EN 12697-48, que define que devem ser testados no mínimo dois provetes do pavimento em estudo, em que estas amostras devem ter um diâmetro de aproximadamente 150 mm com uma altura de 60 ± 5 mm. A superfície da amostra deve ser parcialmente caroteada, até uma profundidade de aproximadamente 10 mm abaixo da interface em estudo, com um diâmetro de 100 ± 2 mm.

Antes de colar a pastilha metálica ao provete, este deve ser condicionado a 23 ± 5 °C durante 24 ± 4 h, para assegurar que a superfície está seca. A superfície deve ser lisa, não deve ter pó, gordura ou outra substância que possa impedir uma boa colagem. A pastilha metálica deve ser colada ao provete na zona que foi parcialmente caroteada, usando preferencialmente uma cola de epóxi tixotrópica em dois componentes, de acordo com o fabricante e respeitando o tempo de cura, mas a descontinuidade gerada deve permanecer isenta de cola.

De acordo com o projecto de norma prEN 12697-48 o procedimento do ensaio deve ser o seguinte:

1. O conjunto do provete com a pastilha metálica colada deve ser condicionado pelo menos 12 horas a uma temperatura de $10 \pm 0,5$ °C;
2. Após o condicionamento o provete deve ser instalado no equipamento até 30 segundos. O conjunto do provete com a pastilha metálica é ligado à máquina de tração;
3. A carga no segmento de 100 mm é aplicada a uma taxa constante de 200 N/s, até se dar a rotura;
4. Registrar a força máxima ($F_{máx}$) em N e o diâmetro da superfície circular segmentada (D) em milímetros;

Para o caso em que o ensaio decorra *in situ* ou em lajes recolhidas do pavimento, existem aparelhos mais ligeiros e fáceis de manusear, como esquematizado na figura 2.14.

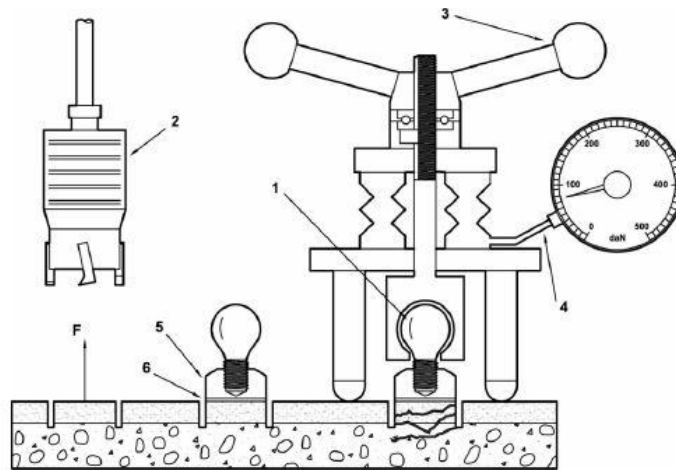


Figura 2.14 - Aparelho de tração *Pull-off* manual, Oz (2015)

Em que:

- 1 – Parafuso metálico
- 2 – Êmbolo de teste do aparelho
- 3 – Manivela
- 4 – Mostrador da força aplicada
- 5 – Pastilha metálica
- 6 – Cola

Neste caso o procedimento de ensaio é muito semelhante ao preconizado no prEN 12697-48, a preparação do ensaio inicia-se com a execução de um caroteamento parcial com 50 mm de diâmetro, perpendicular à superfície, até uma profundidade de 10 mm abaixo da interface de ligação entre camadas em estudo. Após a secagem da superfície, procede-se à sua limpeza e posterior colagem das pastilhas metálicas de ensaio com cola de epóxi tixotrópica em dois componentes ao provete. Finda a cura desta colagem, o parafuso metálico é instalado na pastilha metálica, e coloca-se o aparelho de tração de modo a que o êmbolo encaixe no parafuso metálico, e dá-se início ao ensaio de tração.

Como explicado anteriormente, o ensaio de aderência por tração direta *Pull-off* consiste na aplicação de uma força de tração, neste caso exercida manualmente através da manivela do aparelho. A tração é transmitida axialmente à pastilha metálica colada no provete. O aumento gradual da força pode ser observado directamente no mostrador, e é registado o valor da força aderência à tração assim que se dá o arrancamento do provete pela sua secção mais frágil (Oz, 2015).

Para os dois dispositivos de ensaio referidos é necessária a determinação da tensão de aderência à tração, que é calculada pelo quociente entre a força máxima obtida em Newton e a área ensaiada em milímetros. Assim, a tensão máxima de aderência é então obtida pela equação 2.3.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (2.3)$$

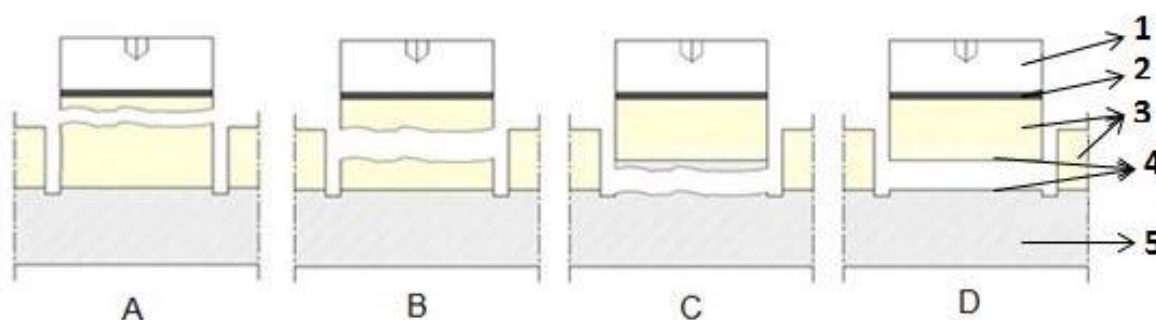
Em que:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ – Tensão máxima de aderência [MPa];

$F_{m\acute{a}x}$ – Força de rotura [N];

A – Área da superfície do provete [mm²];

Uma das vantagens deste método é que analisando o provete, pode observar-se os mecanismos de rotura ocorridos. A figura 2.15 apresenta os quatro tipos de rotura que podem ser observados por este ensaio, que são a rotura pela ligação do provete ao dispositivo de ensaio, a rotura coesiva da camada superior, a rotura coesiva da camada inferior e a rotura adesiva da interface em estudo.



1 - pastilha metálica, 2 - cola, 3 - camada superior, 4 – interface de estudo, 5 – camada inferior, A – rotura pela ligação do provete ao dispositivo de ensaio, B – rotura coesiva da camada superior, C – rotura coesiva da camada inferior, D – rotura adesiva pela interface em estudo
 Figura 2.15 – Mecanismos de rotura do ensaio *Pull-off*, adaptado de Nabais (2015)

A vantagem deste método de ensaio é que de uma forma relativamente simples se obtém a tensão máxima de tracção da camada, sendo este método aplicável tanto em laboratório como *in-situ* (RILEM, 2012).

Contudo, (Tscheegg et al., e Partl e Raab, citados em Sutanto, 2009) observaram que este método demonstra uma grande dispersão de resultados. Esta dispersão pode dever-se a vários factores, nomeadamente, transmissão de carga excêntrica devido a uma possível inclinação do êmbolo de carga e efeito de escala no que se refere ao diâmetro do provete ou à relação entre a máxima dimensão do agregado/diâmetro do provete.

Além disso, este teste não é adequado para estudar a ligação entre camadas quando a resistência à tração da camada superior do pavimento é inferior à resistência à tração da interface (caso B). Este teste mede apenas a força de tração não podendo ser utilizado para aferir o efeito da ligação dos agregados na interface do pavimento.

2.4.4. *Torque Bond Test*

O *torque bond test* é um método para avaliar a ligação entre camadas de um pavimento rodoviário e consiste em torcer a camada superior do provete a uma rotação contante induzindo a rotura da interface por torção. Este método consiste na medição da força máxima de torção que causa a separação entre as camadas em análise (RILEM, 2012).

O ensaio de *torque* foi originalmente desenvolvido na Suécia para avaliar *in situ* a ligação entre camadas betuminosas de pavimentos (Sutanto, 2009).

Este método avalia a resistência à tensão de corte horizontal, e é adequado para estudar a ligação entre camadas de pavimentos *in situ* ou em laboratório, avalia a resistência a tensões geradas pelo tráfego (aceleração e travagens) e por variações térmicas quando as camadas do mesmo pavimento são constituídas por materiais diferentes, pode ser executado imediatamente após a aplicação do pavimento, e quando a camada sobrejacente da interface de estudo possui uma espessura inferior a 15 mm pode ser utilizado para avaliar a durabilidade dessa camada (prEN 12697-48).

O projecto de norma prEN 12697-48, que também preconiza a realização deste método de ensaio refere que para cada local onde se queira avaliar a ligação entre camadas, devem ser testados seis provetes, recolhidos a menos de 2 m de distancia entre si mas afastados no mínimo 100 mm.

Segundo o prEN 12697-48, a preparação do ensaio inicia-se com um caroteamento parcial da superfície do pavimento até uma profundidade de aproximadamente 20 ± 5 mm abaixo da interface em estudo, com um diâmetro de 100 mm. Procede-se à limpeza da superfície, que deve apresentar-se seca, para posterior colagem de uma placa metálica paralelamente à superfície do pavimento. Aplica-se uma força de *toque* a uma velocidade contante tal que se percorra 90° em 30 ± 15 s, tomando especial cuidado para que esta força seja aplicada paralelamente à superfície do provete em análise. O ensaio acaba quando se atingir a rotura ou quando o momento de torque exceda os 400 Nm, nesse momento deve registar-se o valor da força de *torque* máxima registada, em Nm, e a temperatura da amostra ensaiada imediatamente após a rotura.

Este procedimento por ser manual, resulta na dificuldade em controlar a velocidade de execução do ensaio, porque a força de *torque* é desconhecida e porque o valor desta força também é afectado pelo deslocamento imposto na execução do ensaio .

Por razões práticas o método manual de *torque*, geralmente, apenas é executado para avaliar a interface entre a camada de desgaste e a camada de regularização, e tipicamente apenas realizado *in situ*. É de notar que como este ensaio é feito sem um encamisamento do provete parcialmente caroteado, pode gerar-se uma força lateral de corte na interface. Além disso, este teste não é

adequado quando a resistência à força de torque da camada betuminosa é inferior à resistência à força de torque da interface (Sutanto, 2009).

2.5. Considerações finais

Em suma, uma correcta ligação entre camadas é um factor determinante para que as tensões geradas à superfície do pavimento sofram uma degradação em profundidade, não afectando a constituição do pavimento, e assegurando que o comportamento para o qual o pavimento foi dimensionado seja o seu comportamento real.

Para garantir a correcta ligação entre camadas, é necessário um controlo do processo construtivo do pavimento e identificar os factores que influenciam esta ligação, para os controlar e minimizar os seus efeitos.

Num pavimento que se apresenta em serviço torna-se necessário avaliar o estado de ligação das camadas constituintes, sendo que os métodos destrutivos, embora impliquem a destruição parcial de certas secções do pavimento, são os métodos que fornecem uma avaliação da ligação entre camadas de forma directa e fiável. Dentro destes métodos destaca-se o ensaio de corte pelo método de *Leutner* modificado e o ensaio de tração *Pull-off*, como sendo os mais utilizados pela comunidade científica para este tipo de avaliação.

3. CASO DE ESTUDO

3.1. Considerações iniciais

Esta dissertação tem como objetivo o estudo da ligação entre camadas de pavimentos flexíveis através do ensaio de corte, de acordo com a metodologia do ensaio de *Leutner* modificado, e do ensaio de tração *Pull-off*, tendo sido realizados ensaios sobre provetes obtidos de duas obras reais, correspondentes a um pavimento aeroportuário e um pavimento rodoviário.

Estes dois casos de estudo, designados por obra A e obra B, têm constituições de pavimento, materiais e características distintas, e, em ambos, foram ensaiados tarolos correspondentes à plena via e a um trecho experimental construído especificamente para a colheita de amostras para ensaio. Para o ensaio de corte *Leutner* foi ainda comparado o mesmo pavimento com amostras recolhidas em campo e fabricadas em laboratório.

3.2. Descrição do caso de estudo

- **Obra A**

A constituição do pavimento na plena via da obra A, do topo para a fundação, é de 4,5 cm de SMA11 Surf PMB 45/80-65 (*Stone Mastic Asphalt*) correspondente à camada de desgaste, 6 cm de mistura betuminosa densa que constitui a camada de regularização, 9 cm de macadame betuminoso 35/50 em camada de base (AC20 base 35/50 MB), 9 cm de mistura betuminosa de alto módulo 10/20 em camada de base inferior (AC20 base 10/20 MBAM), e agregado britado de granulometria extensa nas camadas granulares inferiores.

Entre a camada de base e a camada subjacente, foi aplicada uma grelha de reforço em fibra de carbono que é assente depois da aplicação de uma emulsão betuminosa catiónica do tipo C60BP4TER termoaderente de rotura rápida, com uma taxa de aplicação de 400 g/m².

Segundo PROBIALP (2015), uma emulsão betuminosa é uma dispersão estável de betume em água. As emulsões podem se classificar segundo a natureza iónica, a velocidade de rotura e o teor em betume asfáltico. Sendo que uma emulsão do tipo C60BP4TER significa que quanto à natureza iónica é do tipo catiónica (o emulsionante confere carga positiva às partículas de betume), com um teor de 60% em betume modificado com polímeros, e com classe de rotura 4.

Na figura 3.1 apresenta-se um esquema da constituição do pavimento.

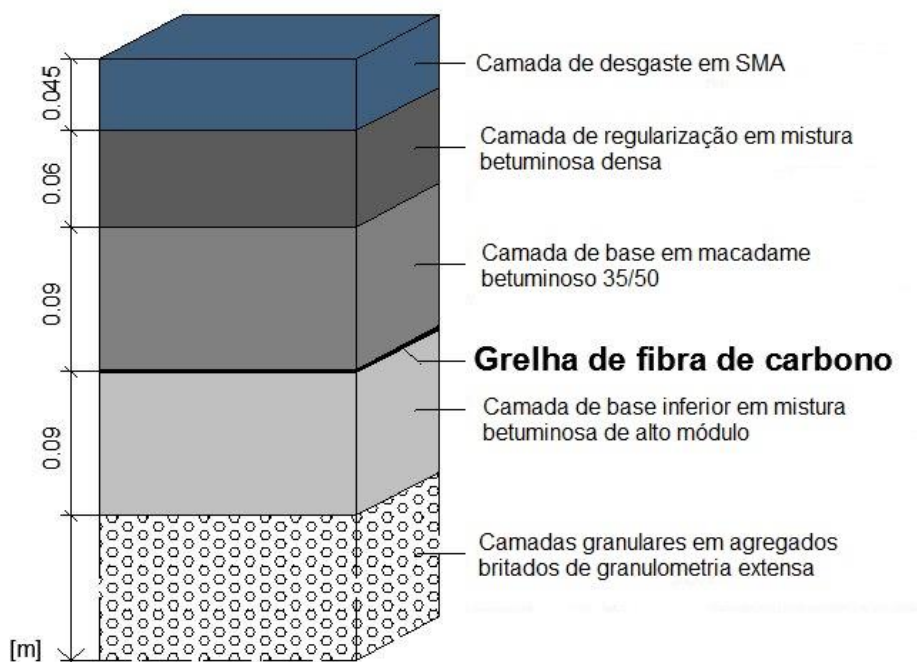


Figura 3.1 - Constituição do pavimento da plena via da obra A

As misturas betuminosas de alto módulo (MBAM) para camadas de base de pavimentos têm sido utilizadas com sucesso, principalmente em França, desde a década de 80, quando estas foram apresentadas como sendo substancialmente melhores face aos mecanismos de ruína do que as misturas betuminosas tradicionalmente usadas. Essa melhoria de desempenho foi conseguida à custa da utilização de materiais diferentes, sendo a principal modificação o recurso a um betume duro. No entanto, a experiência da utilização de tais materiais em Portugal é reduzida (Capitão et al., 2004).

Neste caso, o estudo da ligação entre camadas foi focado na interface entre a camada de base e a camada de base inferior, pois é onde está situada a grelha de reforço. Como tal proceder-se-á à descrição mais detalhada da composição destas camadas.

Segundo a norma NP EN 13108-1:2011 e o caderno de encargos tipo das Estradas de Portugal (EP, 2011) as misturas betuminosas aplicadas na obra A são designadas da seguinte forma:

AC20 base 35/50 MB – AC é uma referência ao produto em causa, *Asphalt Concrete*; 20 é a dimensão correspondente à abertura do primeiro peneiro onde o material granular fica retido, neste caso 20 mm; *base* é a camada a que se destina a mistura, neste caso a camada de base; 35/50 é a gama de penetração do ligante a 25°C, neste caso a mínima é de 35 e a máxima de 50 x0.1mm; MB é macadame betuminoso do fuso A.

AC20 base 10/20 MBAM - AC é uma referência ao produto em causa, *Asphalt Concrete*; 20 é a dimensão correspondente à abertura do primeiro peneiro onde o material granular fica retido, neste caso 20 mm; *base* é a camada a que se destina a mistura, neste caso a camada de base; 10/20 é a

gama de penetração do ligante a 25°C, neste caso a mínima é de 10 e a máxima de 20 x0.1mm; MBAM é mistura betuminosa de alto módulo.

No Quadro 3.1 apresentam-se em síntese as proporções da mistura dos agregados na camada betuminosa sobrejacente à grelha.

Quadro 3.1 - Proporções da mistura dos agregados na camada betuminosa sobrejacente à grelha na plena via da obra A

Tipo de Agregado	Proporção na Mistura [%]
Fracção Calcária 12/20	30
Fracção Calcária 8/12	28
Fracção Calcária 0/4	20
Fracção Basáltica 0/4	20
Fíler	2

O fíler desempenha um papel fundamental na determinação das propriedades e do comportamento da mistura, sendo que este toma um comportamento do tipo *material inerte* por preencher os vazios entre os agregados mais grossos da mistura, conferindo-lhe uma maior resistência (Guerra, 2015).

Quanto ao ligante betuminoso este é de penetração nominal de 35/50, que segundo a norma NP EN 12591:2011 é descrito como sendo um betume para pavimentação com utilização prevista para a construção de estradas, aeroportos e outras áreas pavimentadas.

A percentagem de betume da mistura é de 4,4% e o valor da adesividade betume/agregado é de 93%.

No Quadro 3.2 apresentam-se em síntese as proporções da mistura de agregados na camada betuminosa subjacente à grelha.

Quadro 3.2 - Proporções da mistura dos agregados na camada betuminosa subjacente à grelha na plena via da obra A

Tipo de Agregado	Proporção na Mistura [%]
Fracção Calcária 12/20	20
Fracção Calcária 8/12	32
Fracção Calcária 0/4	23
Fracção Basáltica 0/4	23
Fíler	2

O ligante betuminoso desta camada é de penetração nominal 10/20 cuja descrição é de um betume de penetração duro, para produção de misturas betuminosas de alto módulo, que segundo a norma EN 13924:2006 tem como uso previsto a construção e manutenção de estradas, aeroportos e outras áreas pavimentadas.

A percentagem de betume da mistura betuminosa é de 5,1% e o valor da adesividade betume/agregado é de 93%.

Apresenta-se nas Figuras 3.2 e 3.3, a título ilustrativo, a aplicação da grelha de reforço em fibra de carbono no pavimento e a passagem do cilindro para garantir a perfeita aderência entre a grelha e a emulsão betuminosa aplicada sobre a camada de base inferior. Anota-se que os aspectos construtivos na aplicação da grelha são condicionantes a uma boa adesão entre as camadas.



Figura 3.2 - Grelha de fibra de carbono aplicada no pavimento da obra A



Figura 3.3 - Passagem com o cilindro para promover a perfeita adesão da grelha de fibra de carbono à camada de base inferior da obra A

Relativamente à obra A, foram realizados ensaios sob amostras de campo recolhidas num trecho experimental, construído para efeitos de estudo, cuja constituição é igual ao pavimento da plena via mas a emulsão betuminosa constituinte da rega de colagem foi aplicada a uma taxa de 500 g/m².

- **Obra B**

Os dados fornecidos deste caso de estudo, tanto para a plena via como para o trecho experimental realizado no âmbito deste estudo, foram apenas as formulações das camadas subjacentes e sobrejacentes à interface a analisar, não havendo, portanto, indicação da estrutura completa do pavimento existente nem da espessura das camadas, dado que se está perante uma reabilitação.

Para a plena via desta obra, analisou-se a interface entre camadas de base sem a presença de grelha de reforço, que constitui o conjunto de referência, e com presença de grelha de reforço em fibra de vidro.

As camadas estudadas na plena via são, do topo para a fundação, uma camada de base AC 20 base 35/50 (MB) macadame betuminoso fuso A com 10% de material fresado e a camada betuminosa fresada existente.

Segundo a norma NP EN 13108-1:2011 e o caderno de encargos tipo das Estradas de Portugal (EP, 2011) as misturas betuminosas aplicadas na obra B são designadas da seguinte forma:

AC20 base 35/50 MB – AC é uma referência ao produto em causa, *Asphalt Concrete*; 20 é a dimensão correspondente à abertura do primeiro peneiro onde o material granular fica retido, neste caso 20 mm; *base* é a camada a que se destina a mistura, neste caso a camada de base; 35/50 é a gama de penetração do ligante a 25°C, neste caso a mínima é de 35 e a máxima de 50 x0.1 mm; MB é macadame betuminoso do fuso A.

A Figura 3.4 ilustra a constituição das camadas referentes à plena via do pavimento da obra B, que constitui o grupo de referência, cuja interface em análise não possui grelha de reforço.

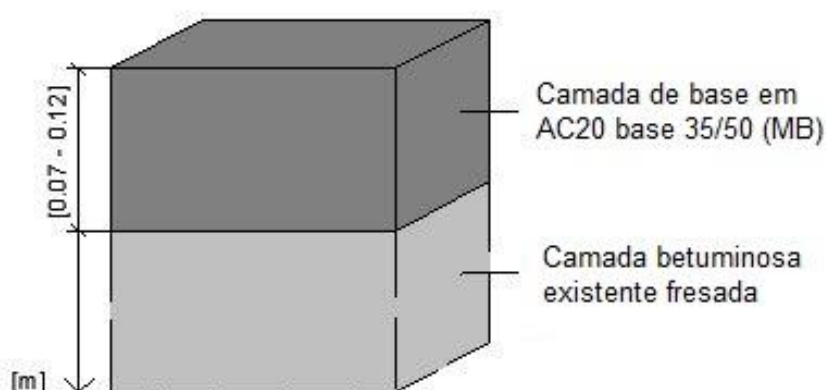


Figura 3.4 - Camadas correspondentes à plena via da obra B cuja interface em análise não possui grelha de reforço

A Figura 3.5 ilustra a constituição das camadas referentes à plena via do pavimento da obra B, cuja interface em análise possui grelha de reforço em fibra de vidro.

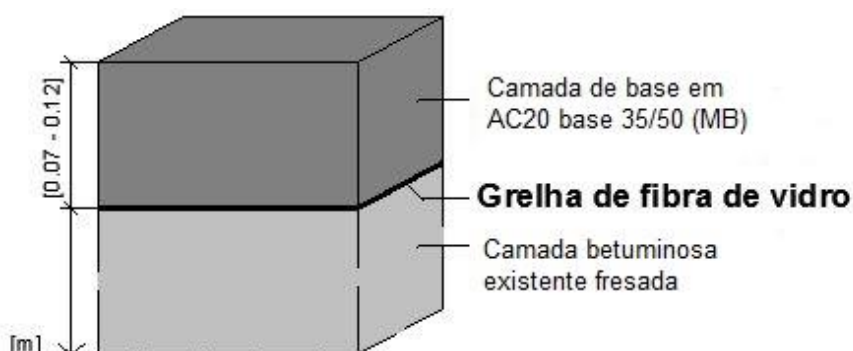


Figura 3.5 – Camadas correspondentes à plena via da obra B cuja interface em análise possui grelha de reforço em fibra de vidro

No Quadro 3.3 apresenta-se a síntese das proporções da mistura de agregados na camada betuminosa sobrejacente à interface.

Quadro 3.3 - Proporções da mistura dos agregados na camada betuminosa sobrejacente à interface em estudo, na plena via da obra B

Tipo de Agregado	Proporção na Mistura [%]
Fracção Granítica 12/20	10
Fracção Granítica 10/14	18
Fracção Granítica 4/10	19
Fracção Granítica 0/4	43
Material Fresado Reciclado	10

Quanto ao ligante betuminoso este apresenta uma penetração nominal 35/50, que segundo a norma NP EN 12591:2011 é descrito como sendo um betume para pavimentação com utilização prevista para a construção de estradas, aeroportos e outras áreas pavimentadas.

A percentagem de betume da mistura é de 4,4% e o valor da adesividade betume/agregado é de 86%.

Em relação à camada subjacente à interface em análise, apenas há a indicação de ser uma camada betuminosa fresada, fazendo parte da estrutura inicial do pavimento em reabilitação.

A rega de colagem, aplicada sobre a camada betuminosa fresada, corresponde a uma emulsão betuminosa catiónica de rotura rápida termoaderente, em que o ligante original é um betume termoaderente modificado quimicamente com polímeros elastoméricos (C60BP4) com uma taxa de aplicação de 450 g/m². No caso de existência de grelha de reforço, esta é aplicada sobre esta rega de colagem de modo a promover a melhor aderência possível entre a grelha aplicada e as camadas betuminosas.

Relativamente ao pavimento do trecho experimental construído no âmbito deste estudo foram analisadas amostras de campo, amostras produzidas em laboratório, e amostras de campo previamente ensaiadas no simulador de tráfego *wheel tracking*, todas com presença de grelha de reforço em fibra de vidro.

Este trecho experimental foi construído na berma do pavimento da obra B numa secção experimental de aproximadamente 2 m por 1,5 m, de onde foram recolhidas lajetas para posteriores ensaios como representado na Figura 3.6. As camadas em estudo no trecho experimental são, do topo para a fundação, uma camada de desgaste AC 14 surf PMB 45/80-65 (BBr) e uma camada de base AC 20 base 35/50 (MB) macadame betuminoso fuso A com 10% de material fresado (igual à camada de base da plena via).



Figura 3.6 – a) Trecho experimental obra B e b) Recolha de amostras

Segundo a norma NP EN 13108-1:2011 e o caderno de encargos tipo das Estradas de Portugal (EP, 2011) as misturas do pavimento do trecho experimental da obra B são designadas da seguinte forma:

AC14 surf PMB 45/80-65 BBr – AC é uma referência ao produto em causa, *Asphalt Concrete*; 14 é a dimensão correspondente à abertura do primeiro peneiro onde o material granular fica retido, neste caso 14 mm; *surf* é a camada a que se destina a mistura, neste caso a camada de desgaste; 45/80 é a gama de penetração do ligante a 25°C, neste caso a mínima é de 45 e a máxima de 80; 65 é a temperatura de amolecimento, 65°C; BBr é betão betuminoso rugoso.

A Figura 3.7 ilustra a constituição das camadas referentes ao trecho experimental, cuja interface em análise possui uma grelha de reforço em fibra de vidro.

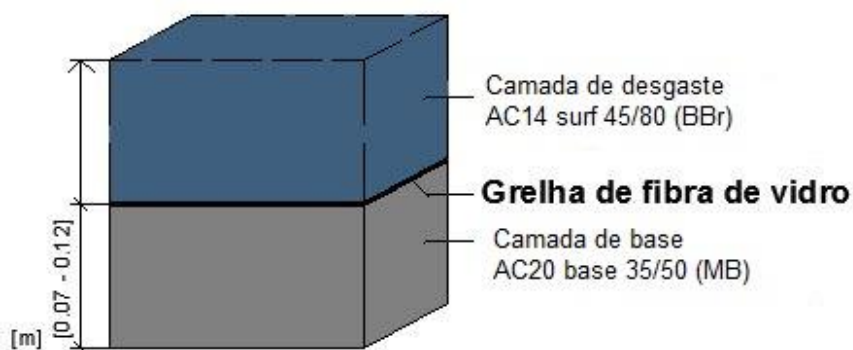


Figura 3.7 - Camadas correspondentes ao trecho experimental da obra B cuja interface em análise possui grelha de reforço em fibra de vidro

No trecho experimental a camada sobrejacente à grelha, correspondente à camada de desgaste, apresentando-se no quadro 3.4 uma síntese das proporções desta mistura.

Quadro 3.4 - Proporções da mistura dos agregados na camada betuminosa sobrejacente à grelha no trecho experimental da obra B

Tipo de Agregado	Proporção na Mistura [%]
Fracção Granítica 10/14	32
Fracção Granítica 4/10	35
Fracção Granítica 0/4	29
Fíler	4

A camada de base do trecho experimental é a mesma utilizada na camada de base da plena via, já descrita anteriormente.

A rega de colagem, aplicada sobre a camada de base, corresponde a uma emulsão betuminosa catiónica de rotura rápida termoaderente, em que o ligante original é um betume modificado quimicamente com polímeros elastoméricos (C60BP4) com uma taxa de aplicação de 350 g/m². A grelha de fibra de vidro é colocada em cima desta rega de colagem.

Apresenta-se nas Figuras 3.8, 3.9 e 3.10, a título ilustrativo, a aplicação da rega de colagem, da grelha de reforço em fibra de vidro no pavimento e a passagem do cilindro para garantir a perfeita aderência entre a grelha e a emulsão betuminosa, respectivamente.



Figura 3.8 - Aplicação da rega de colagem, por meio de barra espargidora



Figura 3.9 - Aplicação da grelha de reforço em fibra de vidro



Figura 3.10 - Passagem com o cilindro para promover a aderência entre a grelha de fibra de vidro e a emulsão betuminosa aplicada

Em síntese, nos Quadros 3.5 e 3.6, apresenta-se a constituição das camadas adjacentes às interfaces analisadas sem presença de grelha de reforço e com presença de grelha de reforço, respetivamente.

Quadro 3.5 - Quadro síntese da constituição das camadas cuja interface em estudo não possui grelha de reforço

Obra B - Plena Via	
Camada sobrejacente à interface	Camada de Base: AC 20 base 35/50 (MB) macadame betuminoso fuso A com 10% fresados
Camada subjacente à interface	Camada betuminosa existente fresada
Rega de colagem	Emulsão betuminosa catiónica, de rotura rápida, termo-aderente, modificada com polímeros C60BP4
Taxa aplicação rega de colagem [g/m ²]	450

Quadro 3.6 - Quadro síntese da constituição das camadas cuja interface em estudo possui grelha de reforço

	Obra A		Obra B	
	Plena via	Trecho experimental	Plena via	Trecho experimental
Tipo de Grelha	Fibra de carbono		Fibra de vidro	
Camada sobrejacente à grelha	Camada de Base: AC 20 base 35/50 (MB) macadame fuso A		Camada de Base: AC 20 base 35/50 (MB) macadame betuminoso fuso A com 10% fresados	Camada de Degaste: AC 14 SURF PMB 45/80-65 (BBr) - Betão Betuminoso Rugoso
Camada subjacente à grelha	Camada de Base Inferior: Mistura Betuminosa Alto Módulo AC20 base 10/20 (MBAM)		Camada betuminosa existente fresada	Camada de Base: AC 20 base 35/50 (MB) macadame betuminoso fuso A com 10% fresados
Rega de colagem	Emulsão betuminosa catiónica, de rotura rápida, termo-aderente, modificada com polímeros C60BP4		Emulsão betuminosa catiónica, de rotura rápida, termo-aderente, modificada com polímeros C60BP4	Emulsão betuminosa catiónica, de rotura rápida, termo-aderente, modificada com polímeros C60BP4
Taxa aplicação rega de colagem [g/m ²]	400	500	450	350

3.3. Avaliação da ligação entre camadas betuminosas com e sem presença de grelha de reforço

O estudo da ligação entre as camadas dos pavimentos correspondentes à obra A e à obra B foi realizado recorrendo a dois métodos de ensaio, o ensaio de corte pelo método de *Leutner* modificado e o ensaio de tração pelo método *Pull-off*.

Para o estudo pelo ensaio de corte foram ensaiadas amostras recolhidas em campo e fabricados em laboratório. Para o estudo por tração apenas foram estudadas amostras recolhidas em campo.

3.3.1. Ensaio de *Leutner* Modificado

Os provetes de ensaio provenientes do campo, foram colhidos do pavimento por sondagem à rotação, com cerca de 150 mm de diâmetro. Visto que a espessura dos tarolos é variável e tendo em conta que espessuras elevadas podem introduzir efeitos indesejados na interface entre as camadas durante a realização do ensaio de *Leutner* modificado, procedeu-se ao corte do material em excesso de modo a obter uma espessura total dos provetes de ensaio entre os 10 cm e os 15 cm.

Os provetes recolhidos em campo e os fabricados em laboratório possuem um diâmetro final de 158 mm.

As Figuras 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14, ilustram o processo de colheita e preparação das amostras, apresentando-se a sua recolha no campo por sondagem à rotação, o seu aspeto na chegada ao laboratório, o corte e o aspeto final dos provetes para o ensaio de *Leutner* modificado, respetivamente.



Figura 3.11 - Recolha de amostras de campo por sondagem à rotação



Figura 3.12 – Aspecto do provete na chegada ao laboratório



Figura 3.13 - Corte dos provetes para o ensaio de *Leutner* modificado



Figura 3.14 - Provede preparado para ensaio *Leutner* modificado

Nos provetes fabricados em laboratório correspondentes às duas obras em análise, foram produzidas lajes com presença de grelha de reforço na interface das camadas em estudo. A mistura betuminosa foi fornecida pelo empreiteiro das duas obras em apreço, bem como a respetiva emulsão aplicada.

O processo de fabrico das amostras de laboratório segue as mesmas premissas que a construção do pavimento *in situ*. Estas amostras são obtidas através de lajetas compactadas em laboratório com o equipamento roller-compactador. Estas lajetas têm 40 cm de comprimento por 30 cm de largura, tendo sido primeiramente aplicada a mistura betuminosa correspondente à camada subjacente à interface em estudo, tendo em seguida sido aplicada a rega de colagem com a mesma dosagem da aplicada em campo, e sobre esta a grelha de reforço que é aquecida e pressionada para uma perfeita adesão à camada subjacente. Por último é colocada a mistura correspondente à camada sobrejacente à interface, que é sujeita a compactação com recurso ao mesmo equipamento.

Depois de arrefecidas as lajetas são desmoldadas, prosseguindo-se ao seu caroteamento para a obtenção de tarolos para a realização de ensaio de *Leutner* modificado.

A Figura 3.15 apresenta as várias fases do processo de fabrico das lajetas em laboratório.

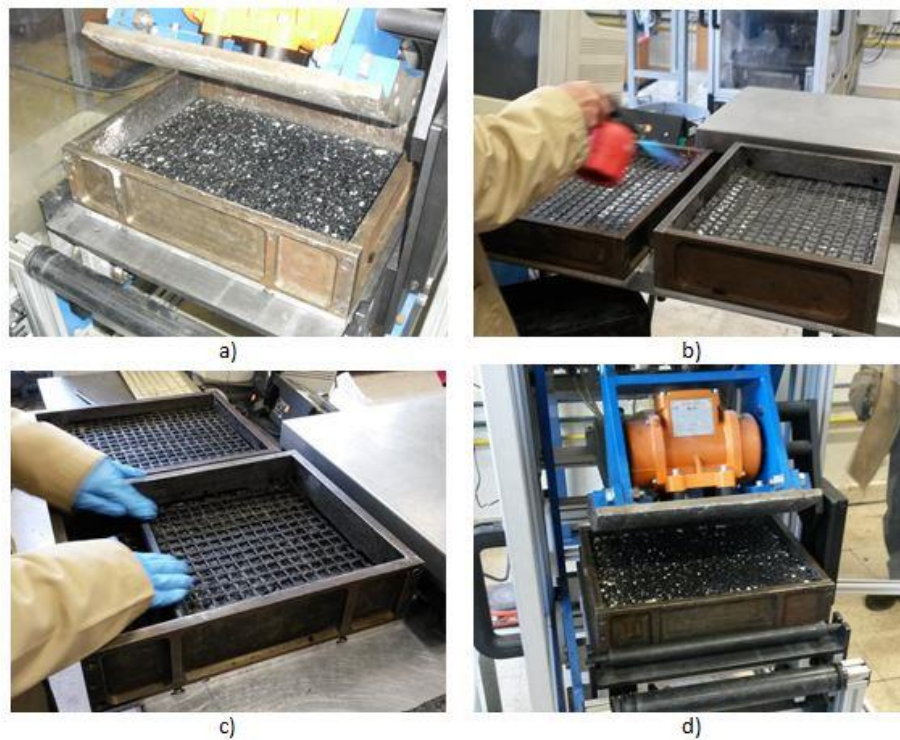


Figura 3.15 - Processo de fabrico de lajes em laboratório

- a) compactação da camada subjacente, b) aquecimento da grelha, c) compactação da grelha, d) compactação da camada sobrejacente

Depois de arrefecidas até à temperatura ambiente, as lajetas são desmoldadas e marcadas, procedendo-se o seu caroteamento, como ilustra a Figura 3.16.



Figura 3.16 - Preparação de laje fabricada em laboratório para caroteamento

Nos ensaios pelo método de *Leutner* modificado, conforme preconizado no *Appendix A.1 do Manual of Contract Documents for Highway Works (2008)*, foi adotado o seguinte procedimento:

1. Colocação das amostras em ambiente termicamente controlado, a uma temperatura de $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$, durante um período mínimo de 5 horas
2. Posicionamento da amostra no dispositivo de ensaio, de modo a que ficasse entre os anéis superior e inferior e a interface em estudo alinhada com o a descontinuidade que exerce a tensão de corte
3. Aplicação da tensão de corte a uma taxa de deslocamento de $50,0 \pm 2$ mm/minuto
4. Paragem do carregamento depois de atingida a tensão de rotura do material

Note-se que os provetes de ensaio mantiveram-se condicionados a temperatura controlada até ao momento da realização do ensaio.

Na figura 3.17 apresenta-se o decorrer do ensaio de *Leutner* modificado.



Figura 3.17 - Ensaio de *Leutner* modificado

Apresenta-se no Quadro 3.7 uma síntese dos valores recomendados por Sutanto (2009) e pelas normas Suíça e Alemã, expostos no capítulo 2.3, expressos em força e tensão através da expressão 2.1, bem como o recomendado para o deslocamento máximo devido a forças de corte.

Quadro 3.7 - Síntese dos valores recomendados pela bibliografia para força, tensão e deslocamento de corte

	Norma Suíça SN 640 430	Norma Alemã ZTV Asphalt - StB 07 (citada em Vaitkus et al. 2012)	Sutanto (2009)
Força de corte mínima na ligação entre camada de desgaste e camada de regularização [kN]	15	15	18
Força de corte mínima na ligação entre restantes camadas de base [kN]	12	12	9
Tensão de corte mínima na ligação entre camada de desgaste e camada de regularização [MPa]	0,9	0,9	1
Tensão de corte mínima na ligação entre restantes camadas de base [MPa]	0,7	0,7	0,5
Deslocamento na ligação entre camada de desgaste e camada de regularização [mm]	-	2,0 a 4,0	-
Deslocamento na ligação entre restantes camadas de base [mm]	-	1,5 a 3,0	-

Analisando as recomendações para os valores de corte constantes na bibliografia, pode observar-se que Sutanto (2009) é mais exigente em termos da ligação entre a camada de desgaste e a camada de regularização em relação às normas Suíça (SN 640 430) e Alemã (ZTV Asphalt – StB 07), mas menos exigente no que concerne à ligação das restantes camadas de base.

Neste estudo apenas serão feitas análises comparativas acerca dos deslocamentos obtidos para a força de corte máxima nos provetes ensaiados, pois devido a limitações laboratoriais as amostras não foram todas ensaiadas na mesma prensa de compressão onde o dispositivo de *Leutner* é instalado. Em uma das duas prensas de compressão, os valores dos deslocamentos obtidos não são apenas os deslocamentos da interface de estudo, mas também o deslocamento que a máquina sofre para se acomodar ao dispositivo de ensaio. Os valores foram corrigidos, considerando apenas os deslocamentos registados a partir da reta tangente à zona de inclinação da parte linear do gráfico força/deslocamento.

Apresentam-se em seguida os resultados obtidos para as amostras ensaiadas da obra A e da obra B, bem como alguns dados estatísticos relativos ao conjunto de provetes ensaiados, atendendo a que a tensão máxima de corte ($\sigma_{m\acute{a}x}$) e o módulo de reacção ao corte (k) foram calculados através das expressões 2.1 e 2.2, respetivamente.

Obra A

No Quadro 3.8 apresentam-se os resultados relativos às amostras de campo recolhidas da plena via da obra A, cuja interface possui grelha de reforço em fibra de carbono.

Quadro 3.8 – Resultados do ensaio *Leutner* modificado para amostras de campo recolhidas da plena via da obra A

Obra A - Plena Via com Grelha Fibra de Carbono (Amostras de campo)				
Identificação da amostra	F _{máx} [kN]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	k [MPa/mm]
ACG1	28,8	1,47	2,6	0,56
ACG2	11,6	0,59	1,3	0,46
ACG3	21,6	1,10	1,9	0,58
ACG4	27,6	1,41	1,9	0,74
ACG5	8,8	0,45	1,6	0,28
ACG6	25,4	1,30	2,3	0,56
ACG7	21,8	1,11	2,2	0,51
ACG8	14,8	0,75	2,0	0,38
Valor médio	20,1	1,0	2,0	0,5
Desvio-padrão	7,49	0,38	0,41	0,14

Em que:

$F_{m\acute{a}x}$ – Força de corte máxima na interface entre camadas;

$\sigma_{m\acute{a}x}$ – Tensão máxima de corte na interface entre camadas;

$\delta_{m\acute{a}x}$ – Deslocamento aquando da rotura por corte na interface entre camadas;

k – Módulo de rigidez de corte;

Analisando os resultados apresentados tem-se que o valor médio obtido para a força máxima de corte é de 20,1 kN. Pode observar-se a existência de alguma variação dos valores obtidos, sendo que, o maior valor da força máxima de corte, correspondente ao provete ACG1, é de 28,8 kN e o menor valor, correspondente ao provete ACG5, é de 8,8 kN, sendo que se considera este último valor anómalo.

As Figuras 3.18 e 3.19 apresentam, a título de exemplo, o registo da inspeção visual dos tarolos ACG1 e ACG5, respetivamente, após ensaio de *Leutner* modificado. Anota-se que este tipo de inspeção da superfície está preconizada no documento normativo aplicável e poderá permitir explicar ou justificar os resultados obtidos, nomeadamente com a identificação do tipo de superfície visível, a presença de rega de colagem e o aspeto final da grelha aplicada após a realização do ensaio de *Leutner*.

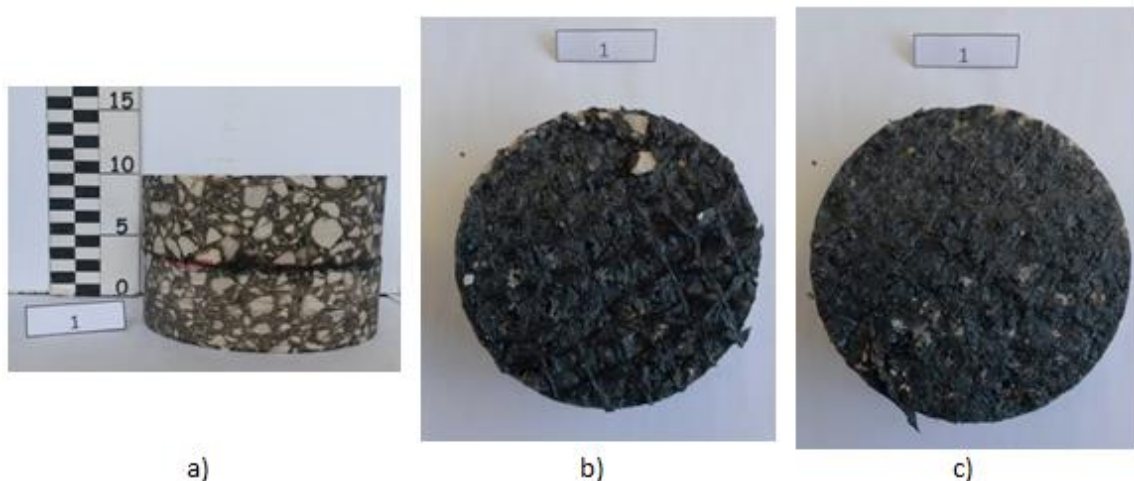


Figura 3.18 - Inspeção visual do tarolo ACG1 após ensaio de *Leutner* modificado, a) Aspecto do tarolo após ensaio b) Interface da camada superior c) Interface da camada inferior

Na Figura 3.18 pode observar-se a diferenciação entre camadas e a presença da grelha de reforço. Após a força máxima de corte ser atingida foi necessário forçar o destacamento das duas camadas manualmente, o que reforça a qualidade da ligação entre camadas. O aspeto da interface após o corte apresenta-se regular, é visível uma aplicação uniforme da rega de colagem e tem-se uma rotura pela emulsão, visto que a grelha de reforço ficou na face da camada superior.

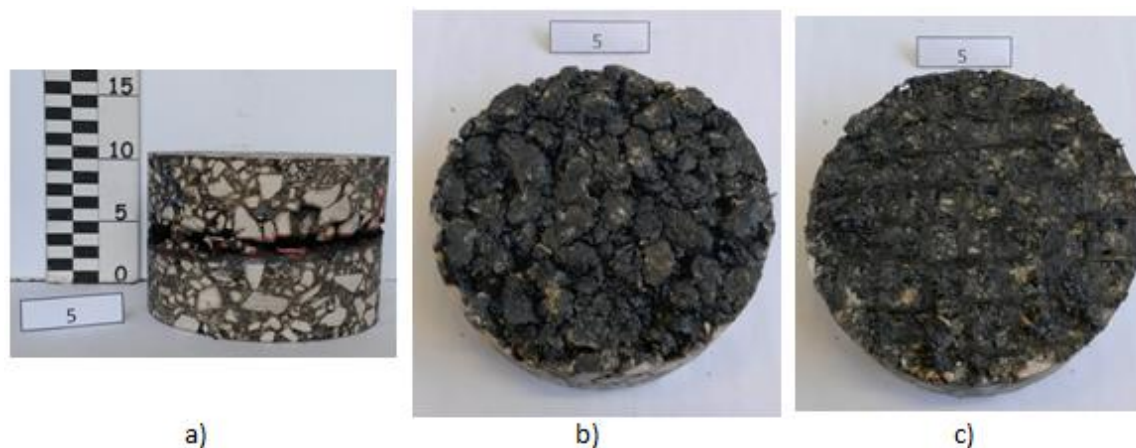


Figura 3.19 - Inspeção visual do tarolo ACG5 após ensaio de *Leutner* modificado, a) Aspecto do tarolo após ensaio b) Interface da camada superior c) Interface da camada inferior

Na Figura 3.19 pode observar-se a diferenciação entre camadas e a grelha de reforço. O aspecto da interface após o corte apresenta-se regular, embora seja notório um arranjo dos agregados na interface da camada superior com alguns vazios e não tão compacto, é visível a aplicação da rega de colagem embora com algumas falhas. A rotura deu-se pela grelha, visto que esta ficou na face inferior.

O valor correspondente ao provete ACG5 é um valor anómalo possivelmente devido a falhas de aplicação de rega de colagem e/ou falhas na compactação da camada superior.

Retirando o valor anómalo correspondente ao provete ACG5, temos os seguintes valores médios e o desvio-padrão associado, como apresentado no Quadro 3.9.

Quadro 3.9 - Valores médios e de desvio padrão para amostras de campo recolhidas da plena via da obra A, excluindo o provete ACG5

Obra A - Plena Via com Grelha Fibra de Carbono (Amostras de campo)				
Sem ACG5	F _{máx} [kN]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	$\delta_{máx}$ [mm]	k [MPa/mm]
Valor médio	21,7	1,1	2,0	0,5
Desvio-padrão	6,44	0,33	0,41	0,11

Com a exclusão do valor corresponde ao provete ACG5 continua a observar-se alguma dispersão em relação ao valor médio obtido, que pode ser resultado do processo construtivo, evidenciando assim a importância que este tem, nomeadamente no que se refere à aplicação da rega de colagem e à metodologia de colocação da grelha de reforço, nas características da ligação entre as camadas.

Em termos de força/tensão de corte esta ligação entre camadas de base demonstra um bom desempenho, pois supera os valores propostos pela bibliografia. Em termos de deslocamentos denota-se que este se encontra dentro do intervalo sugerido pela norma alemã ZTV Asphalt – StB 07.

No Quadro 3.10 apresentam-se os resultados relativos às amostras fabricadas em laboratório correspondentes à plena via da obra A, cuja interface possui grelha de reforço em fibra de carbono.

Quadro 3.10 – Resultados do ensaio *Leutner* modificado para amostras fabricadas em laboratório, correspondentes à plena via da obra A

Obra A - Plena Via com Grelha Fibra de Carbono (Amostras de laboratório)				
Identificação da amostra	F _{máx} [kN]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	$\delta_{máx}$ [mm]	k [MPa/mm]
ALG1	33,6	1,71	2,1	0,84
ALG2	31,7	1,62	1,7	0,96
ALG3	27,3	1,39	1,9	0,74
ALG4	35,6	1,82	1,6	1,14
ALG5	25,2	1,29	1,7	0,74
ALG6	21,8	1,11	1,3	0,83
Valor médio	29,2	1,5	1,7	0,9
Desvio-padrão	5,34	0,27	0,25	0,15

Em que:

$F_{máx}$ – Força de corte máxima na interface entre camadas;

$\sigma_{máx}$ – Tensão máxima de corte na interface entre camadas;

$\delta_{máx}$ – Deslocamento aquando da rotura por corte na interface entre camadas;

k – Módulo de rigidez de corte;

Analisando os valores obtidos, tem-se que o valor médio da força máxima de corte é de 29,2 kN, em que o maior valor é de 35,6 kN, correspondente ao provete ALG4, e o menor valor, correspondente ao provete ACG6, é de 21,8 kN.

Pode observar-se uma boa consistência nos valores obtidos, como esperado para provetes fabricados em laboratório, em que apenas o valor correspondente ao provete ALG6 apresenta uma maior variação em relação ao valor médio apresentado.

Em termos de força/tensão de corte esta ligação entre camadas de base demonstra um bom desempenho, pois supera os valores propostos pela bibliografia. Em termos de deslocamentos denota-se que este se encontra dentro do intervalo sugerido pela norma alemã ZTV Asphalt – StB 07.

No Quadro 3.11 apresentam-se os resultados relativos às amostras de campo recolhidas no trecho experimental da obra A, cuja interface possui grelha de reforço em fibra de carbono.

Quadro 3.11 - Resultados do ensaio *Leutner* modificado para amostras de campo recolhidas do trecho experimental da obra A

Obra A - Trecho Experimental com Grelha Fibra de Carbono (Amostras de campo)				
Identificação da amostra	F _{máx} [kN]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	$\delta_{máx}$ [mm]	k [MPa/mm]
ACGT1	40,2	2,05	2,0	1,04
ACGT2	42,8	2,18	2,1	1,04
ACGT3	45,8	2,34	2,2	1,09
ACGT4	45,3	2,31	2,1	1,10
ACGT5	44,0	2,24	2,1	1,07
ACGT6	37,6	1,92	2,2	0,88
Valor médio	42,6	2,2	2,1	1,0
Desvio-padrão	3,17	0,16	0,07	0,08

Em que:

$F_{máx}$ – Força de corte máxima na interface entre camadas;

$\sigma_{máx}$ – Tensão máxima de corte na interface entre camadas;

$\delta_{máx}$ – Deslocamento aquando da rotura por corte na interface entre camadas;

k – Módulo de rigidez de corte;

Para os resultados correspondentes ao trecho experimental da obra A, tem-se que o maior valor da força máxima de corte é de 45,8 kN, que corresponde ao provete ACGT3, e que o menor valor da força máxima de corte é de 37,6 kN, correspondente ao provete ACGT6.

Estes valores denotam uma muito boa consistência dos resultados obtidos, dado que a dispersão em relação ao valor médio é considerada baixa, o que expressa uma boa aplicação deste pavimento em obra.

Em termos de força/tensão de corte esta ligação entre camadas de base demonstra um bom desempenho, pois supera os valores propostos pela bibliografia. Em termos de deslocamentos denota-se que este se encontra dentro do intervalo sugerido pela norma alemã ZTV Asphalt – StB 07.

Obra B

No Quadro 3.12 apresentam-se os resultados relativos às amostras de campo recolhidas da plena via da obra B, cuja interface não possui grelha de reforço.

Quadro 3.12 – Resultados do ensaio *Leutner* modificado para amostras de campo recolhidas da plena via da obra B cuja interface não possui grelha de reforço

Obra B - Plena Via sem Grelha de Reforço (Amostras de campo)				
Identificação da amostra	F _{máx} [kN]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	$\delta_{máx}$ [mm]	k [MPa/mm]
BC1	41,2	2,10	3,3	0,64
BC2	39,0	1,99	3,7	0,54
BC3	33,2	1,69	3,2	0,53
BC4	36,1	1,84	3,4	0,54
BC5	44,6	2,27	3,8	0,60
Valor médio	38,8	2,0	3,5	0,6
Desvio-padrão	4,42	0,23	0,26	0,05

Em que:

$F_{máx}$ – Força de corte máxima na interface entre camadas;

$\sigma_{máx}$ – Tensão máxima de corte na interface entre camadas;

$\delta_{máx}$ – Deslocamento aquando da rotura por corte na interface entre camadas;

k – Módulo de rigidez de corte;

Analisando os valores obtidos para o pavimento sem incorporação de grelha, que caracteriza o pavimento em estudo, tem-se como valor médio da força de corte máxima 38,8 kN, sendo que o maior valor registado é de 44,6 kN e o menor valor 33,2 kN.

Os valores obtidos apresentam uma boa consistência de resultados, validando a qualidade da construção do pavimento e a da ligação entre as camadas.

Em termos de força/tensão de corte esta ligação entre camadas de base demonstra um bom desempenho, pois supera os valores propostos pela bibliografia. Em termos de deslocamentos denota-se que este se encontra um pouco acima do intervalo sugerido pela norma alemã ZTV Asphalt – StB 07.

No Quadro 3.13 apresentam-se os resultados relativos às amostras de campo recolhidas da plena via da obra B, cuja interface possui grelha de reforço em fibra de vidro.

Quadro 3.13 – Resultados do ensaio *Leutner* modificado para amostras de campo recolhidas da plena via da obra B

Obra B - Plena Via com Grelha Fibra de Vidro (Amostras de campo)				
Identificação da amostra	F _{máx} [kN]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	$\delta_{máx}$ [mm]	k [MPa/mm]
BCG1	35,9	1,83	3,6	0,51
BCG2	30,4	1,55	3,4	0,46
BCG3	29,2	1,49	2,6	0,57
BCG4	34,5	1,76	2,8	0,63
BCG5	35,3	1,80	3,3	0,55
Valor médio	33,1	1,7	3,1	0,5
Desvio-padrão	3,05	0,16	0,42	0,07

Em que:

$F_{máx}$ – Força de corte máxima na interface entre camadas;

$\sigma_{máx}$ – Tensão máxima de corte na interface entre camadas;

$\delta_{máx}$ – Deslocamento aquando da rotura por corte na interface entre camadas;

k – Módulo de rigidez de corte;

Para as amostras recolhidas da plena via com presença de grelha de fibra de vidro, temos que o valor médio obtido para a força máxima de corte é de 33,1 kN, em que o maior valor obtido, correspondente ao provete BCG1 é de 35,9 kN, e o menor valor obtido é de 29,2 kN correspondente ao provete BCG3.

Os valores obtidos são consistentes, pois apresentam uma baixa dispersão em relação ao valor médio, o que evidencia a qualidade de construção do pavimento bem como da ligação entre camadas, à semelhança do verificado para a ligação sem grelha.

Em termos de força/tensão de corte esta ligação entre camadas de base demonstra um bom desempenho, pois supera os valores propostos pela bibliografia. Em termos de deslocamentos denota-se que este se encontra ligeiramente acima do intervalo sugerido pela norma alemã ZTV Asphalt – StB 07, à semelhança do verificado para a ligação sem grelha de reforço.

No Quadro 3.14 apresentam-se os resultados relativos às amostras de campo recolhidas do trecho experimental da obra B, cuja interface possui grelha de reforço em fibra de vidro.

Quadro 3.14 – Resultados do ensaio *Leutner* modificado para amostras de campo recolhidas do trecho experimental da obra B

Obra B - Trecho Experimental com Grelha Fibra de Vidro (Amostras de campo)				
Identificação da amostra	F _{máx} [kN]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	$\delta_{máx}$ [mm]	k [MPa/mm]
BCGT1	37,9	1,93	2,1	0,92
BCGT2	43,6	2,22	3,8	0,59
BCGT3	52,3	2,67	3,9	0,68
BCGT4	43,6	2,22	3,3	0,67
Valor médio	44,4	2,3	3,3	0,7
Desvio-padrão	5,94	0,30	0,83	0,14

Em que:

$F_{máx}$ – Força de corte máxima na interface entre camadas;

$\sigma_{máx}$ – Tensão máxima de corte na interface entre camadas;

$\delta_{máx}$ – Deslocamento aquando da rotura por corte na interface entre camadas;

k – Módulo de rigidez de corte;

Para as amostras recolhidas do trecho experimental com presença de grelha de fibra de vidro, temos que o valor médio obtido para a força máxima de corte é de 44,4 kN, em que o maior valor obtido, correspondente ao provete BCGT3 é de 52,3 kN, e o menor valor obtido é de 37,9 kN correspondente ao provete BCGT1.

Os valores obtidos apresentam alguma dispersão, o que demonstra uma aplicação do pavimento menos consistente, devido à discrepância entre o maior e o menor valor para a força máxima de corte. Este facto pode ser resultado da dificuldade associada à construção de um trecho experimental com dimensões reduzidas e cujas camadas betuminosas foi necessário compactar com os meios mecânicos usualmente aplicados em pavimentos com as dimensões habituais.

Em termos de força/tensão de corte esta ligação entre camada de desgaste e camada de base demonstra um bom desempenho, pois supera os valores propostos pela bibliografia. Em termos de deslocamentos denota-se que este se encontra dentro do intervalo sugerido pela norma alemã ZTV Asphalt – StB 07.

No Quadro 3.15 apresentam-se os resultados relativos às amostras de campo recolhidas do trecho experimental da obra B, cuja interface possui grelha de reforço em fibra de carbono, e que foram previamente ensaiados no simulador de tráfego *wheel tracking*. É de salientar que estes provetes de ensaio foram caroteados de duas lajetas abrangendo tanto quanto possível a área deformada do ensaio anterior, de modo a poder avaliar a resistência da interface ao corte nestas condições.

Quadro 3.15 – Resultados do ensaio *Leutner* modificado para amostras de campo recolhidas do trecho experimental da obra B, previamente ensaiados no simulador de tráfego

Obra B - Trecho Experimental com Grelha Fibra de Vidro Simulador de Tráfego (Amostras de campo)				
Identificação da amostra	F _{máx} [kN]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	$\delta_{máx}$ [mm]	k [MPa/mm]
BCGTW1	32,6	1,66	3,2	0,52
BCGTW2	35,7	1,82	3,9	0,46
BCGTW3	34,4	1,75	4,0	0,43
BCGTW4	35,0	1,79	3,7	0,49
Valor médio	34,4	1,8	3,7	0,5
Desvio-padrão	1,34	0,07	0,38	0,04

Em que:

$F_{máx}$ – Força de corte máxima na interface entre camadas;

$\sigma_{máx}$ – Tensão máxima de corte na interface entre camadas;

$\delta_{máx}$ – Deslocamento aquando da rotura por corte na interface entre camadas;

k – Módulo de rigidez de corte;

Para as amostras recolhidas do trecho experimental construído com a presença de grelha de fibra de vidro ensaiadas no simulador de tráfego, temos que o valor médio obtido para a força máxima de corte é de 34,4 kN, em que o maior valor obtido, correspondente ao provete BCGTW2 é de 35,7 kN, e o menor valor obtido é de 32,6 kN correspondente ao provete BCGTW1.

Os valores obtidos apresentam uma dispersão pouco significativa em relação ao valor esperado para a força máxima de corte, em resultado de uma adequada aplicação e compactação, na zona onde foram recolhidas as amostras.

Em termos de força/tensão de corte esta ligação entre camada de desgaste e camada de base demonstra um bom desempenho, pois supera os valores propostos pela bibliografia. Em termos de deslocamentos denota-se que este se encontra dentro do intervalo sugerido pela norma alemã ZTV Asphalt – StB 07.

No Quadro 3.16 apresentam-se os resultados relativos às amostras fabricadas em laboratório correspondentes ao trecho experimental da obra B, cuja interface possui grelha de reforço em fibra de vidro.

Quadro 3.16 – Resultados do ensaio *Leutner* modificado para amostras fabricadas em laboratório, correspondentes ao trecho experimental da obra B

Obra B - Trecho Experimental com Grelha Fibra de Vidro (Amostras de laboratório)					
Identificação da amostra	Lajeta de fabrico	F _{máx} [kN]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	$\delta_{máx}$ [mm]	k [MPa/mm]
BLG1	1	39,0	1,99	1,7	1,20
BLG2	2	29,0	1,48	1,9	0,79
BLG3	1	40,4	2,06	1,9	1,11
BLG4	2	31,5	1,60	1,5	1,31
BLG5	2	25,4	1,29	1,7	1,26
Valor médio		33,0	1,7	1,7	1,1
Desvio-padrão		6,46	0,33	0,17	0,21

Em que:

$F_{máx}$ – Força de corte máxima na interface entre camadas;

$\sigma_{máx}$ – Tensão máxima de corte na interface entre camadas;

$\delta_{máx}$ – Deslocamento aquando da rotura por corte na interface entre camadas;

k – Módulo de rigidez de corte;

Para as amostras fabricadas em laboratório correspondentes ao trecho experimental com presença de grelha de fibra de vidro, tem-se que o valor médio obtido para a força máxima de corte é de 33 kN, em que o maior valor obtido, correspondente ao provete BLG3 é de 40,4 kN, e o menor valor obtido é de 25,4 kN correspondente ao provete BLG5.

A dispersão entre resultados não é concordante com o pressuposto para amostras fabricadas em laboratório. Analisando o fabrico das lajetas, tem-se que os provetes ensaiados são provenientes de 2 lajetas diferentes, os provetes BLG1 e BLG3 da lajeta 1, e os provetes BLG2, BLG4 e BLG5 da lajeta 2. Daqui se verifica que a dispersão apresentada resulta de valores obtidos para as duas lajetas, o que evidencia alguma diferença nas características das mesmas.

Em termos de força/tensão de corte esta ligação entre camada de desgaste e camada de base demonstra um bom desempenho, pois supera os valores propostos pela bibliografia. Em termos de deslocamentos denota-se que este se encontra ligeiramente abaixo do intervalo sugerido pela norma alemã ZTV Asphalt – StB 07.

Consideram-se ainda, em termos de análise comparativa, os resultados apresentados no Quadro 3.17 obtidos em Marcelino, et al. (2013), cujo estudo foi realizado sem e com presença de grelha de reforço em fibra de vidro na interface entre uma camada de desgaste do tipo AC14 surf 35/50 (BB) e uma camada betuminosa existente, com aplicação de rega de colagem com emulsão betuminosa termo-aderente modificada com polímeros, com uma taxa de aplicação de 500 g/m².

Quadro 3.17 - Resultados do ensaio de *Leutner* modificado de Marcelino, et al. (2013), sem presença grelha de reforço e com presença de grelha de reforço em fibra de vidro

Resultados do Artigo de Marcelino et al. (2013)					
Identificação da amostra	Presença de grelha na interface	F _{máx} [kN]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	$\delta_{máx}$ [mm]	k [MPa/mm]
SG1	Não	27,1	1,64	4,6	0,36
SG2	Não	29,2	1,77	4,7	0,38
SG3	Não	31,5	1,91	5,6	0,34
SG4	Não	23,4	1,42	4,3	0,33
Valor médio		27,8	1,7	4,8	0,4
Desvio-padrão		3,44	0,21	0,56	0,02
GV1	Sim	13,4	0,81	3,3	0,25
GV2	Sim	17,4	1,05	3,7	0,28
GV3	Sim	18,2	1,10	3,2	0,34
GV4	Sim	16,3	0,99	2,5	0,40
GV5	Sim	25,5	1,55	2,7	0,57
Valor médio		18,2	1,1	3,1	0,4
Desvio-padrão		4,49	0,27	0,48	0,13

Em que:

$F_{máx}$ – Força de corte máxima na interface entre camadas;

$\sigma_{máx}$ – Tensão máxima de corte na interface entre camadas;

$\delta_{máx}$ – Deslocamento aquando da rotura por corte na interface entre camadas;

k – Módulo de rigidez de corte;

Seguidamente, nas Figuras 3.20, 3.21 e 3.22 encontram-se representados graficamente os valores médios e respectivos desvio-padrão para os casos estudados e para os valores obtidos por Marcelino, et al. (2013), anteriormente apresentados e discutidos.

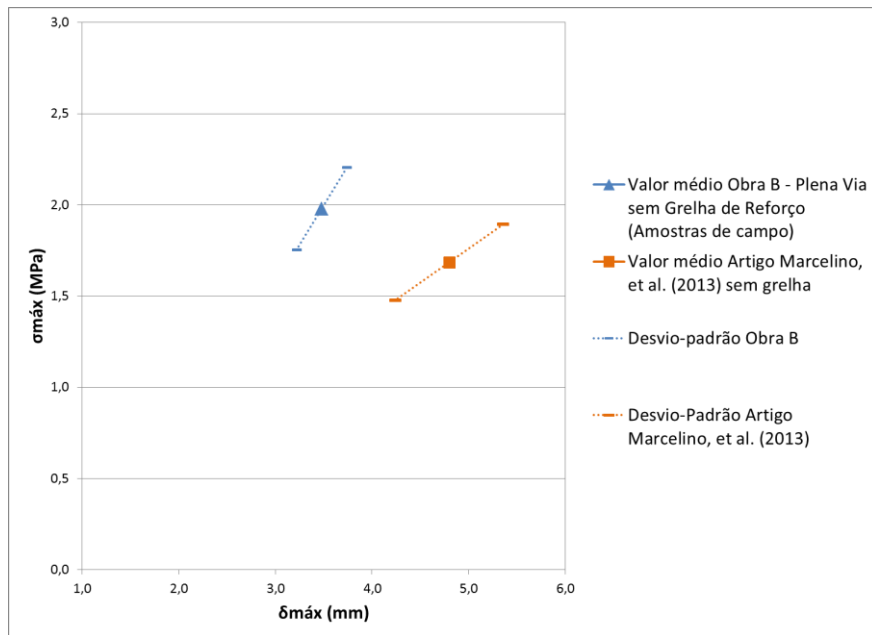


Figura 3.20 - Valores médios e desvio-padrão dos ensaios *Leutner* modificado para amostras que não possuem grelha de reforço na interface em estudo

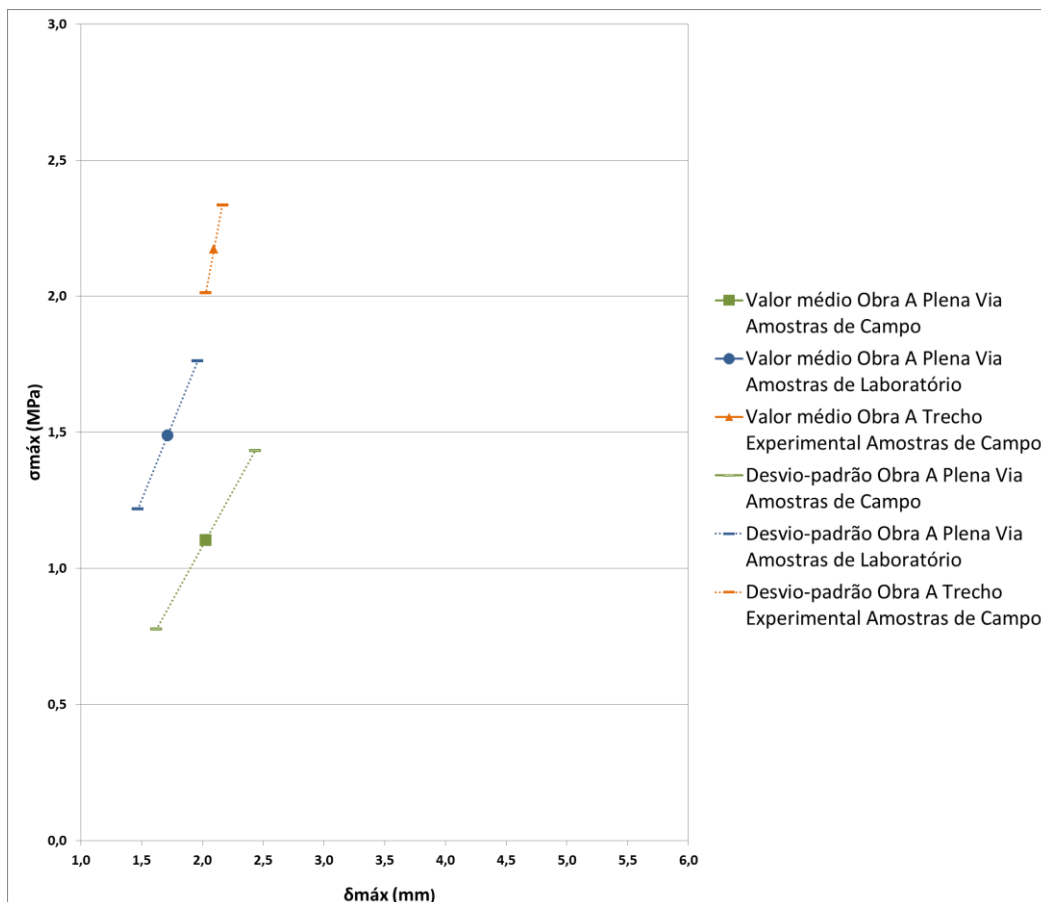


Figura 3.21 - Valores médios e desvio-padrão dos ensaios *Leutner* modificado para amostras que possuem grelha de reforço em fibra de carbono na interface em estudo

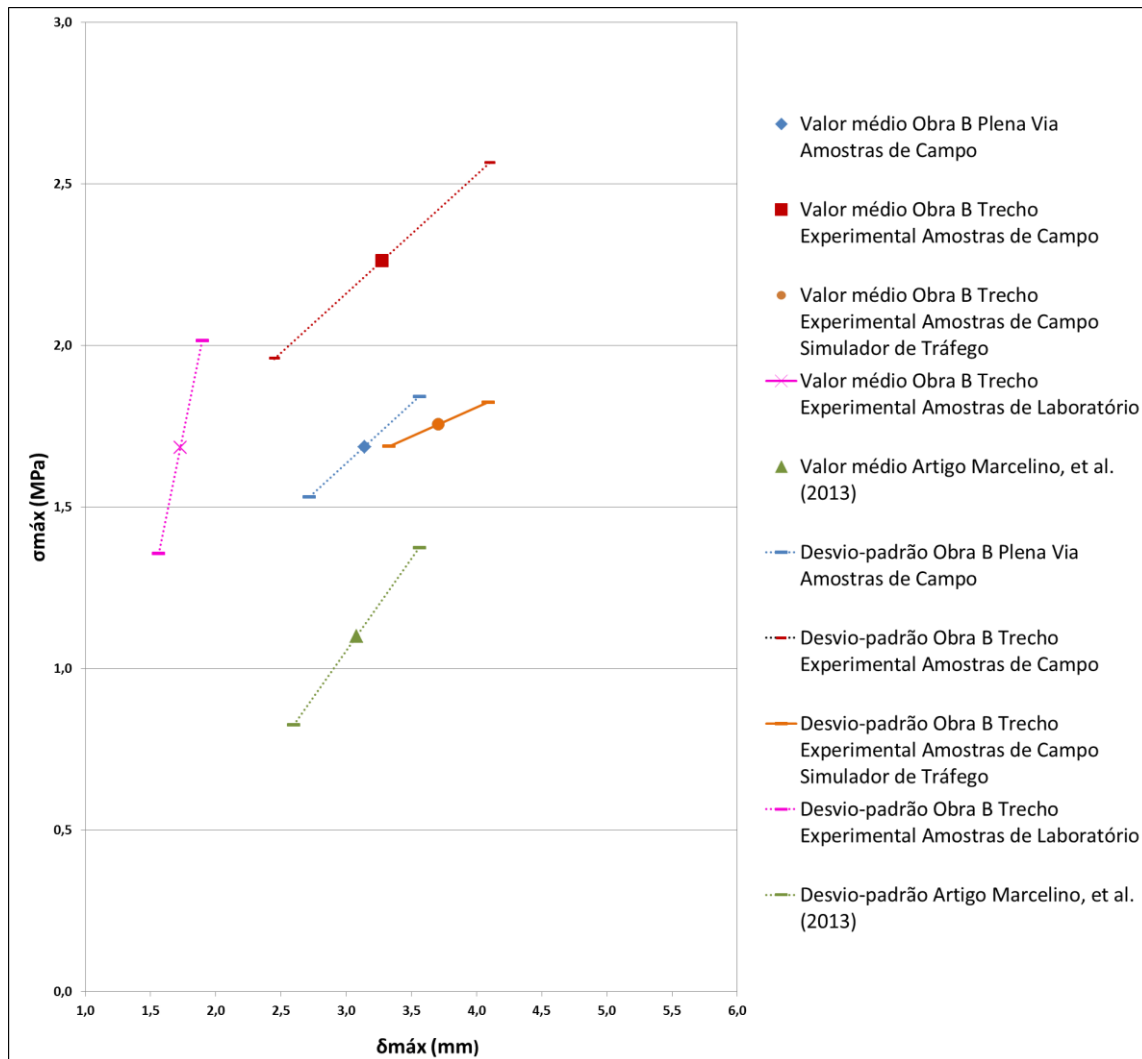


Figura 3.22 - Valores médios e desvio-padrão dos ensaios *Leutner* modificado para amostras que possuem grelha de reforço em fibra de vidro na interface em estudo

3.3.2. Ensaio de tração *Pull-off*

Visto não haver ainda uma norma europeia referente ao ensaio *Pull-off* (está presentemente em curso a elaboração do projecto de norma), este ensaio foi levado a cabo com um equipamento portátil, para aplicação de uma força de tração do tipo *Pull-off*, para provetes de 50 mm de diâmetro. Foi ainda tido em consideração o preconizado na norma ASTM D4541-09 que define métodos de ensaio padrão de ensaios de *Pull-off* utilizando aparelhos portáteis, bem como a temperatura de ensaio de 20°C utilizada por Raab & Partl (2004), de modo a uniformizar a temperatura deste ensaio com o ensaio de *Leutner* modificado.

No âmbito deste estudo, o ensaio de tração *Pull-off* foi realizado em amostras recolhidas em campo através de lajetas. Para a obra A, foram analisadas amostras correspondentes à plena via com

presença de grelha de reforço em fibra de carbono e para a obra B, foram analisadas amostras correspondentes ao trecho experimental construído com a presença de grelha de reforço em fibra de vidro.

Na Figura 3.23 apresenta-se a recolha de lajetas em campo, para o ensaio de *Pull-off*.



Figura 3.23 - Recolha de lajetas em obra para ensaio *Pull-off*

Para a realização do ensaio de tração *Pull-off*, é necessária a colagem de um disco metálico com diâmetro de 50 mm à superfície da camada sobrejacente à interface em estudo. Esta colagem é feita após a perfuração das camadas até cerca de 10 mm abaixo da interface em estudo de forma a criar uma descontinuidade e isolar a área de teste, permitindo assim que se dê a rotura pela ligação mais frágil, que se espera seja a da interface da ligação entre camadas.

Na Figura 3.24 apresenta-se a preparação das amostras e a realização do ensaio de tração *Pull-off*.

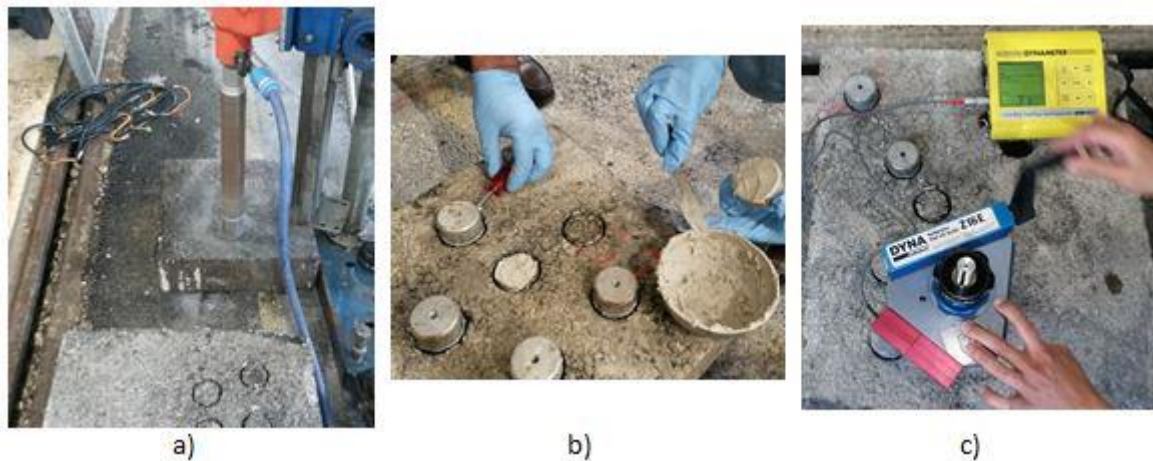


Figura 3.24 - Preparação das amostras para ensaio de tração *Pull-off*

a) Perfuração das camadas para isolamento da área de ensaio b) Colagem das pastilhas metálicas de ensaio c) Ensaio de tração *Pull-off*

Na realização deste ensaio foi utilizado o equipamento *Pull-off tester Z16E*, ao qual foi feita a ligação às pastilhas metálicas e exercida uma força de tração por meio de uma manivela manual com cadência constante. Após rotura, o equipamento regista a força máxima em kN, sendo necessário ter em atenção o diâmetro do provete para obter a respectiva tensão de aderência.

A tensão de aderência foi calculada, através da expressão 2.3, pela média de 5 ensaios de *Pull-off* expressa em [MPa].

Sendo que o diâmetro das amostras é de 50 mm tem-se que a área de ensaio é de $1963,5 \text{ mm}^2$.

De seguida apresentam-se os resultados obtidos para cada caso de estudo, bem como os respectivos tipos de rotura observados nos provetes ensaiados.

Obra A

Na Figura 3.25 apresenta-se o aspecto da lajeta preparada para a realização do ensaio de tração *Pull-off*.



Figura 3.25 - Provetes de ensaio de tração *Pull-off* da obra A

No Quadro 3.18 apresentam-se os resultados do ensaio *Pull-off* para a plena via da obra A, com presença de grelha de reforço em fibra de carbono.

Quadro 3.18 – Resultados do ensaio *Pull-off* para plena via da obra A com presença de grelha de fibra de carbono

Obra A - Plena Via com Grelha de Fibra de Carbono					
Identificação da amostra	F _{máx} [kN]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	Posição da grelha após rotura	Tipo de Rotura	Observações
A1	1,04	0,53	Fixada na camada subjacente	Pela Grelha	-
A2	0,76	0,39	Fixada na camada sobrejacente	Pela Emulsão Betuminosa	-
A3	-	-	-	-	Ocorrência de erro durante o ensaio
A4	0,72	0,37	Fixada na camada subjacente	Pela Grelha	-
A5	0,2	0,10	Fixada na camada subjacente	Pela Grelha	-
A6	1,36	0,69	Fixada na camada sobrejacente	Pela Emulsão Betuminosa	-
Valor médio	0,8	0,4			
Desvio-Padrão	0,43	0,22			

Quanto aos resultados obtidos para o ensaio de tração *Pull-off* correspondentes à plena via com presença de grelha em fibra de carbono, tem-se que o valor médio obtido para a força de rotura é de 0,8 kN, em que o maior valor obtido, correspondente ao provete A6, é de 1,36 kN, e o menor valor obtido é de 0,2 kN, correspondente ao provete A5.

Na Figura 3.26 e na Figura 3.27 apresenta-se o aspecto, respectivamente, dos provetes A1 e A2 antes e depois do ensaio de tração *Pull-off*, e onde se pode observar os tipos de rotura diferentes na interface. No provete A1 pode observar-se que a grelha não está na camada sobrejacente à interface de rotura e, analisando a lajeta de ensaio consegue perceber-se que a grelha ficou na camada subjacente desta interface, sendo que neste caso a rotura se deu pela descontinuidade gerada pela grelha de reforço. No provete A2 pode observar-se que a grelha ficou na camada sobrejacente da interface de rotura, ou seja, que a rotura ocorreu pela emulsão betuminosa da rega de colagem.

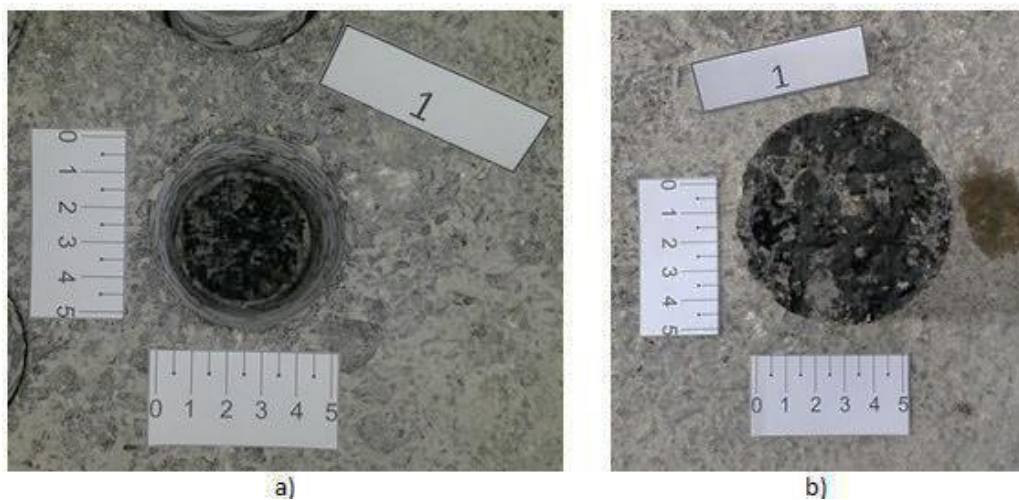


Figura 3.26 - Rotura do provete A1 da obra A após ensaio de tração *Pull-off*
a) Parte subjacente à interface de rotura b) Provete sobrejacente à interface de rotura

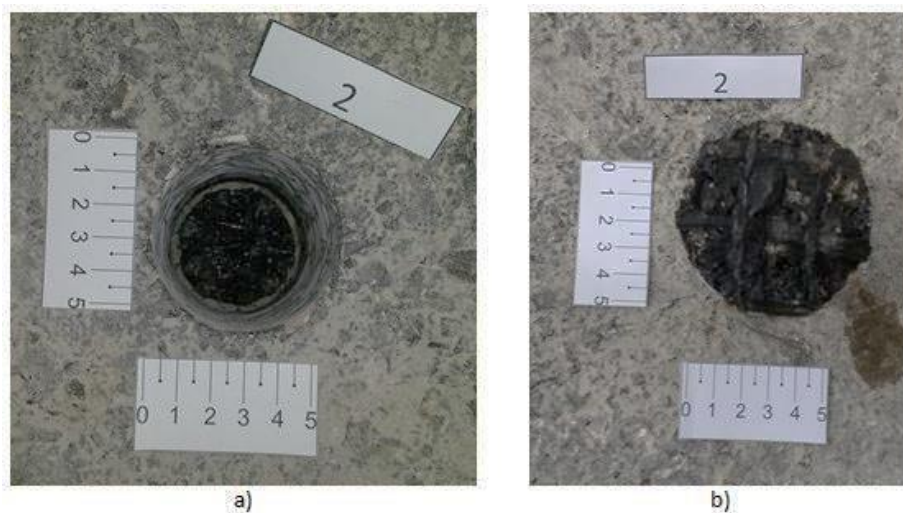


Figura 3.27 - Rotura do provete A2 da obra A após ensaio de tração *Pull-off*
a) Parte subjacente à interface de rotura b) Provete sobrejacente à interface de rotura

O valor correspondente ao provete A5 considera-se anómalo, dada a disparidade do resultado obtido em relação ao conjunto que compõe esta amostra.

Apresenta-se no Quadro 3.19 o valor médio e o desvio-padrão dos resultados do ensaio de tração *Pull-off* para a plena via da obra A, com presença de grelha de reforço em fibra de carbono, excluindo o provete A5.

Quadro 3.19 – Valor médio e desvio-padrão dos resultados do ensaio *Pull-off* para a plena via da obra A com presença de grelha de fibra de carbono, excluindo o provete A5

Obra A - Plena Via com Grelha de Fibra de Carbono	F _{máx} [kN]	σ _{máx} [MPa]
Valor médio	1,0	0,5
Desvio-Padrão	0,30	0,15

Os valores obtidos são consistentes, pois apresentam uma baixa dispersão em relação ao valor médio, o que reforça a qualidade de construção do pavimento e a da ligação entre camadas.

Obra B

Na Figura 3.28 apresenta-se o aspecto da lajeta preparada para a realização do ensaio de tração *Pull-off*.



Figura 3.28 - Provetes de ensaio de tração *Pull-off* da obra B

No Quadro 3.20 apresentam-se os resultados do ensaio *Pull-off* para o trecho experimental da obra B, com presença de grelha de reforço em fibra de vidro.

Quadro 3.20 – Resultados do ensaio *Pull-off* para trecho experimental da obra B com presença de grelha de fibra de vidro

Obra B - Trecho Experimental com Grelha de Fibra de Vidro					
Identificação da amostra	F _{máx} [kN]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	Posição da grelha após ruptura	Tipo de Ruptura	Observações
B1	1,72	0,88	Permaneceu na interface entre camadas	Pelo topo da camada de desgaste	Rotura imediatamente a seguir à colagem das pastilhas de ensaio pull-off
B2	1,51	0,77	Fixada na camada sobrejacente	Pela Emulsão Betuminosa	-
B3	1,30	0,66	Permaneceu na interface entre camadas	Pela camada de base	Rotura imediatamente a baixo da ligação entre camadas
B4	1,66	0,85	Fixada na camada sobrejacente	Pela Emulsão Betuminosa	-
B5	1,59	0,81	Permaneceu na interface entre camadas	Pelo topo da camada de desgaste	Rotura imediatamente a seguir à colagem das pastilhas de ensaio pull-off
B6	1,51	0,77	Permaneceu na interface entre camadas	Pela camada de base	Rotura imediatamente a baixo da ligação entre camadas
Valor médio	1,5	0,8			
Desvio-Padrão	0,15	0,07			

Analisando os resultados obtidos, tem-se como valor médio para a força de ruptura 1,5 kN, sendo o maior valor de ruptura obtido 1,72 kN para o provete B1, e o menor valor de 1,30 kN correspondente ao provete B3. Os valores obtidos apresentam uma baixa dispersão em relação ao valor médio.

Neste ensaio é de salientar os tipos de ruptura que ocorreram nos provetes B1, B5 e pelos provetes B3, B6. A ruptura dos provetes B1 e B5 deu-se pela ligação entre as pastilhas metálicas de ensaio e a camada de desgaste, o que significa que neste ponto esta ligação era mais fraca que a interface entre camadas. A ruptura dos provetes B3 e B6 ocorreu na camada de base, o que denota que a ligação entre camadas tem uma resistência à tração superior à verificada nesta zona da camada de base betuminosa do pavimento.

Na Figura 3.29 apresenta-se a ruptura observada pela ligação entre as pastilhas metálicas de ensaio e a camada de desgaste, representado pelo provete B1.



Figura 3.29 - Ruptura pela ligação entre a pastilha metálica de ensaio e a camada de desgaste, provete A1 da obra A

Na Figura 3.30 está representada a rotura obtida para o provete B2, de onde se observa que esta se deu pela emulsão betuminosa da rega de colagem, pois a grelha ficou na camada subjacente.

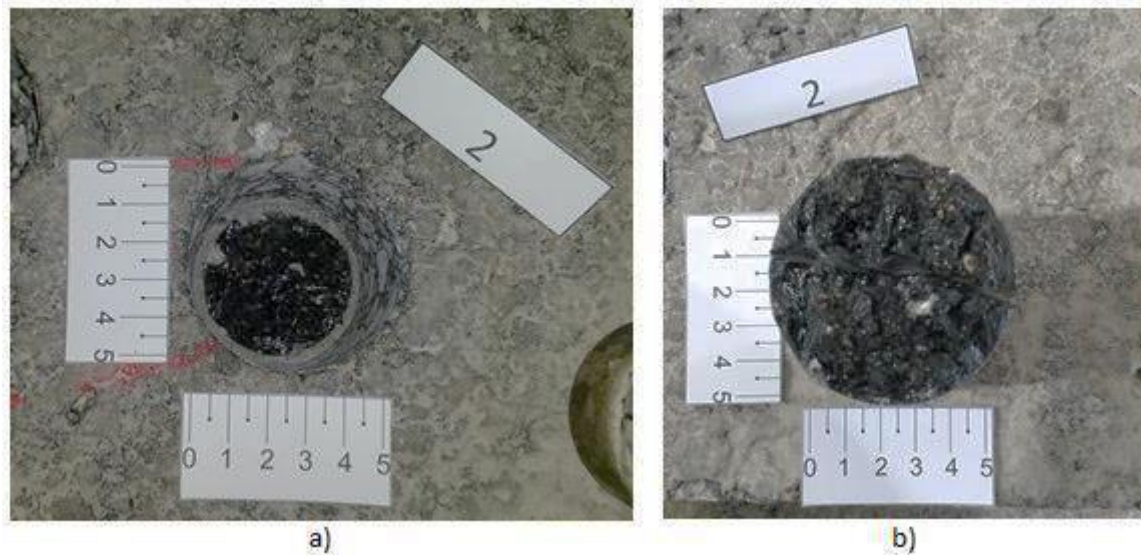


Figura 3.30 - Rotura do provete B2 da obra B após ensaio de tração *Pull-off*
a) Parte subjacente à interface de rotura, b) Provete sobrejacente à interface de rotura

Na Figura 3.31 está representada a situação de rotura pela camada de base, obtida pelos provetes B3 e B6.

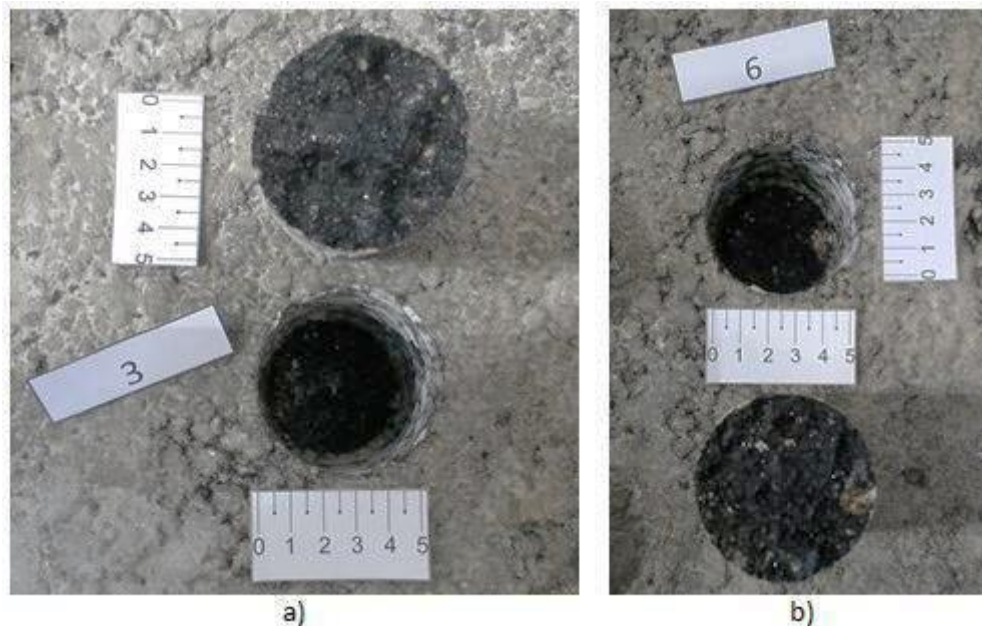


Figura 3.31 – Rotura pela camada de base dos provetes da obra B após ensaio de tração *Pull-off*
a) Parte subjacente à interface de rotura, b) Provete sobrejacente à interface de rotura

Dado que o estudo incide sobre a ligação entre camadas, e dado os tipos de rotura obtidos, apenas os resultados dos provetes B2 e B4 demonstram a resistência à tração da interface de estudo, pelo que os restantes valores serão rejeitados. É de salientar que para as outras situações ensaiadas a força de ligação entre as camadas é superior ao valor obtido, estando a adotar-se portanto uma situação conservativa.

No Quadro 3.21 apresenta-se o valor médio e o desvio-padrão dos resultados do ensaio de tração *Pull-off* para o trecho experimental da obra B, com presença de grelha de reforço em fibra de vidro, excluindo os provetes B1, B3, B5 e B6.

Quadro 3.21 - Valor médio e desvio-padrão dos resultados do ensaio *Pull-off* para o trecho experimental da obra B com presença de grelha de fibra de vidro, excluindo os provetes B1, B3, B5 e B6

Obra B - Trecho Experimental com Grelha de Fibra de Vidro	F _{máx} [kN]	σ _{máx} [MPa]
Valor médio	1,6	0,8
Desvio-Padrão	0,11	0,05

Da análise dos valores obtidos observa-se que estes são consistentes, pois apresentam uma baixa dispersão em relação ao valor médio.

3.4. Considerações finais

Em suma, no Quadro 3.22 apresentam-se os casos que foram estudados para cada tipo de ensaio, sendo que para o ensaio de *Leutner* modificado foram estudados todos os casos e para o ensaio de *Pull-off* apenas foram estudados os casos correspondentes à plena via da Obra A com presença de grelha de fibra de carbono, e ao trecho experimental da Obra B com presença de grelha de fibra de vidro.

Quadro 3.22 - Casos estudados para ensaio de *Leutner* modificado e para ensaio de *Pull-off*

	Obra A - Fibra de Carbono		Obra B - Fibra de vidro			Marcelino et al. (2013) Fibra de Vidro	
	Plena via	Trecho experimental	Plena via		Trecho experimental	Sem Grelha	Com Grelha
	Com Grelha	Com Grelha	Sem Grelha	Com Grelha	Com Grelha		
Ensaio de <i>Leutner</i> modificado	X	X	X	X	X	X	X
Ensaio de <i>Pull-off</i>	X	-	-	-	X	-	-

Para efeitos de análise global do ensaio de *Leutner* modificado, foi ainda tido em conta Marcelino et al. (2013), que possui grelha de fibra de vidro na interface de estudo.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Análise comparativa dos resultados obtidos

Dados os resultados obtidos anteriormente, em que todas as amostras foram ensaiadas para a mesma temperatura de 20°C para os dois métodos de ensaio em estudo, procede-se, em seguida, à sua análise comparativa.

Na Figura 4.1 apresentam-se os resultados do ensaio de *Leutner* modificado para a plena via da obra B sem e com grelha de reforço em fibra de vidro.

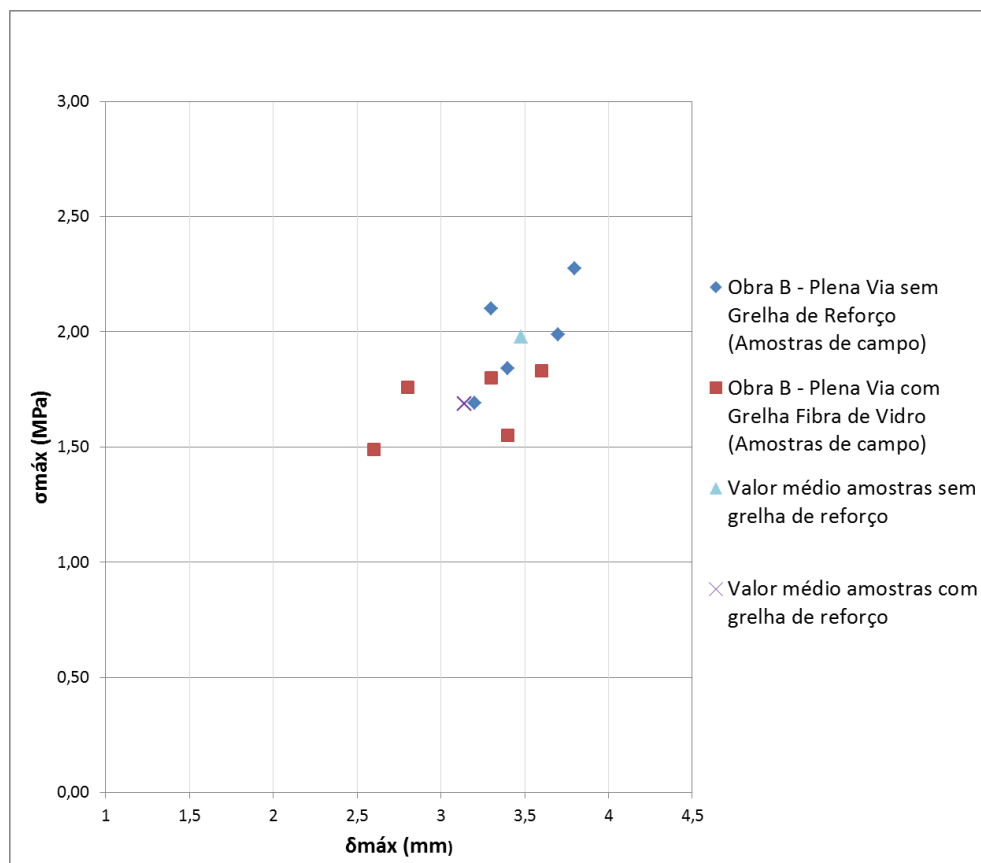


Figura 4.1 - Resultados do ensaio de *Leutner* modificado para a plena via da obra B com e sem grelha de reforço em fibra de vidro

Analisando comparativamente os resultados apresentados na Figura 4.1 tem-se que a introdução da grelha de reforço diminuiu a resistência ao corte em cerca de 14,8% na interface entre a camada de base e a camada fresada já existente.

Esta redução da resistência ao corte da interface em estudo aquando da introdução da grelha de reforço é corroborada pela bibliografia existente, sendo que em Marcelino et al. (2013) se verificou um decréscimo na ordem dos 34,7%, e em Raab e Partl (2004) um decréscimo na ordem de 57,1%.

Este resultado é coerente com a bibliografia aplicável, e explicável pelo facto da introdução de um elemento físico externo ao pavimento que provoca uma descontinuidade e uma possível superfície de deslizamento. Como esperado, a presença de sistemas antirreflexão de fendas na interface, apesar de apresentarem um bom comportamento face ao fenómeno de reflexão de fendas, podem promover uma redução na aderência entre camadas, decorrente da perda parcial do contacto entre as misturas betuminosas (Guimarães, 2013).

Embora a resistência ao corte na interface das camadas tenha diminuído com a aplicação de um reforço antirreflexão de fendas, estes valores demonstram que com os devidos cuidados na aplicação dos materiais se conseguem atingir valores muito semelhantes ao caso em que na interface apenas se aplica rega de colagem, podendo deste modo usufruir das vantagens introduzidas pelo reforço sem comprometer o funcionamento da estrutura do pavimento.

Na Figura 4.2 apresentam-se os resultados do ensaio de *Leutner* modificado para a plena via e para o trecho experimental da obra B.

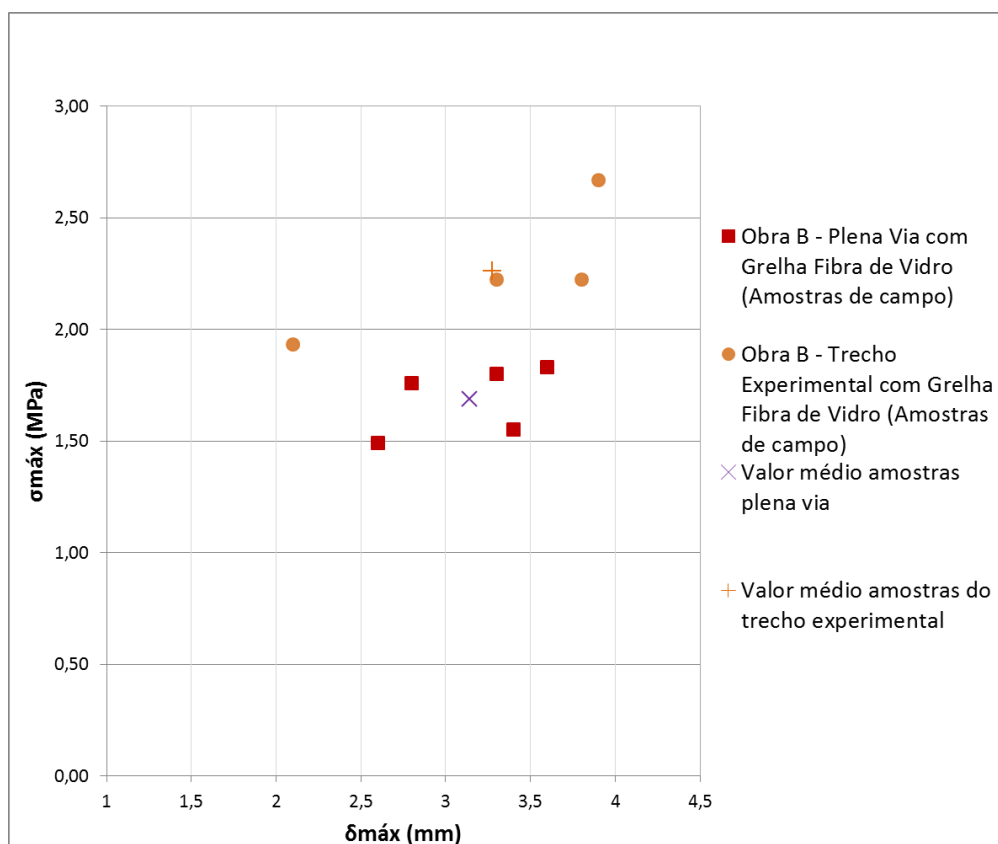


Figura 4.2 - Resultados do ensaio de *Leutner* modificado para a plena via e para o trecho experimental da obra B

Dados os resultados obtidos pode observar-se que o pavimento constituinte do trecho experimental da obra B apresenta uma maior resistência ao corte na interface das camadas em estudo, na ordem dos 25,5% quando comparado com o pavimento constituinte da plena via.

O facto da resistência ao corte da interface no trecho experimental ser superior ao registado na plena via, pode dever-se ao facto de esta secção de teste ter sido construída com este propósito de estudo, e portanto com maior cuidado na aplicação dos materiais. Não obstante, e observando a constituição destes dois tipos de pavimentos, embora a plena via tenha uma taxa de aplicação de rega de colagem maior, apresenta uma resistência ao corte menor que o trecho experimental. Este facto evidencia, e corrobora com a bibliografia existente, nomeadamente Vaitkus, et al. (2012), que afirma resistência ao corte entre camadas depende do tamanho dos agregados utilizados na mistura betuminosa, da quantidade de rega de colagem aplicada e da tecnologia de construção utilizada.

O facto da maior resistência ao corte se ter verificado no trecho experimental em detrimento da plena via, é favorável visto o primeiro se tratar de uma ligação a uma camada de desgaste, que por estar sujeita à acção directa do tráfego e do clima requer maior exigência em relação à qualidade da ligação entre camadas, e o segundo se tratar de uma ligação de camadas de base.

Em termos de deslocamentos pode constatar-se que são semelhantes.

Na Figura 4.3 apresentam-se os resultados do ensaio de *Leutner* modificado para a plena via e para o trecho experimental da obra A.

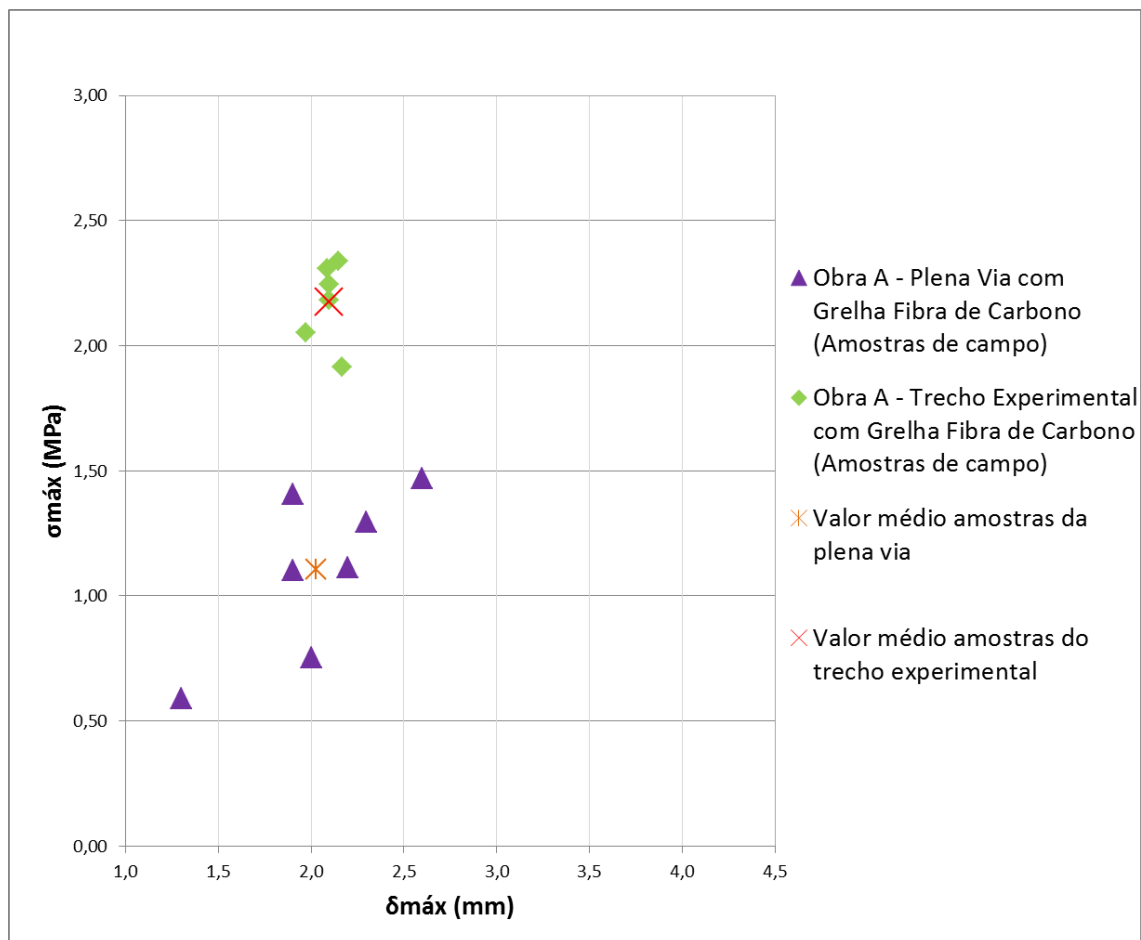


Figura 4.3 - Resultados do ensaio de *Leutner* modificado para a plena via e para o trecho experimental da obra A

No caso da obra A o trecho experimental apresenta melhorias muito expressivas na resistência ao corte da interface quando comparado com o pavimento constituinte da plena via. É de salientar que os deslocamentos se apresentam semelhantes.

Neste caso, e em semelhança ao observado para a obra B, o facto da resistência ao corte do trecho experimental ser superior ao registado para a plena via, prende-se com o facto de este trecho ter sido construído com este propósito de estudo, e conseqüentemente com maior cuidado na aplicação dos materiais, e esta melhoria é tão expressiva (cerca de 49,2%) pois dado que a constituição do pavimento é igual nos dois casos, conclui-se que uma maior taxa de aplicação de rega de colagem conduz a uma melhor ligação entre camadas. Contudo, esta afirmação é comparativa, ou seja para esta mistura betuminosa e para esta emulsão betuminosa, uma aplicação de 500 g/m² de rega de colagem conduz a uma melhor ligação entre camadas que aplicações a taxas inferiores, pois segundo Guimarães (2013) uma excessiva aplicação de rega de colagem diminui o atrito entre camadas e gera uma superfície de escorregamento entre camadas.

Mais estudos seriam necessários para determinar a quantidade ótima de rega de colagem, visto que esta varia consoante os materiais e os processos construtivos do pavimento em análise, como se pode constatar nos estudos levados a cabo por Sutradhar (2012) e por Plug e Bondt (2010).

Na Figura 4.4 apresentam-se os resultados do ensaio de *Leutner* modificado para provetes referentes à plena via da obra A, retirados em campo e produzidos em laboratório.

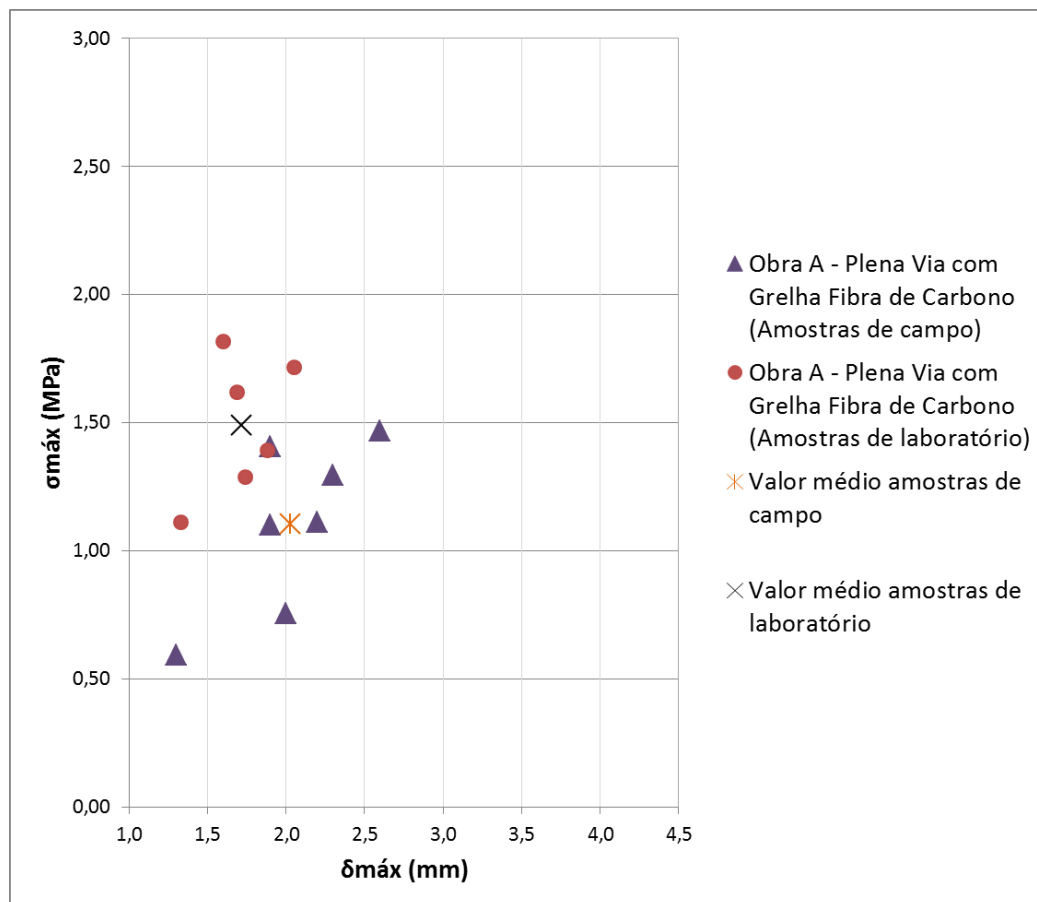


Figura 4.4 - Resultados do ensaio de *Leutner* modificado para provetes retirados em campo e produzidos em laboratório referentes à plena via da obra A

Comparando os resultados obtidos em provetes retirados de campo e produzidos em laboratório, observa-se, como seria expectável, uma maior resistência ao corte, na ordem dos 26%, nos provetes produzidos em laboratório. Este facto deve-se a que em laboratório as condições de fabrico dos provetes de ensaio serem a uma escala muito menor e num ambiente controlado, logo o processo construtivo é mais cuidado.

Este resultado demonstra a importância do acompanhamento do processo construtivo em obra, para garantir que a rega de colagem é aplicada de modo uniforme em todo o pavimento e que a compactação das camadas é a correcta.

Na Figura 4.5 apresentam-se os resultados do ensaio de *Leutner* modificado para provetes referentes ao trecho experimental da obra B, retirados em campo e produzidos em laboratório.

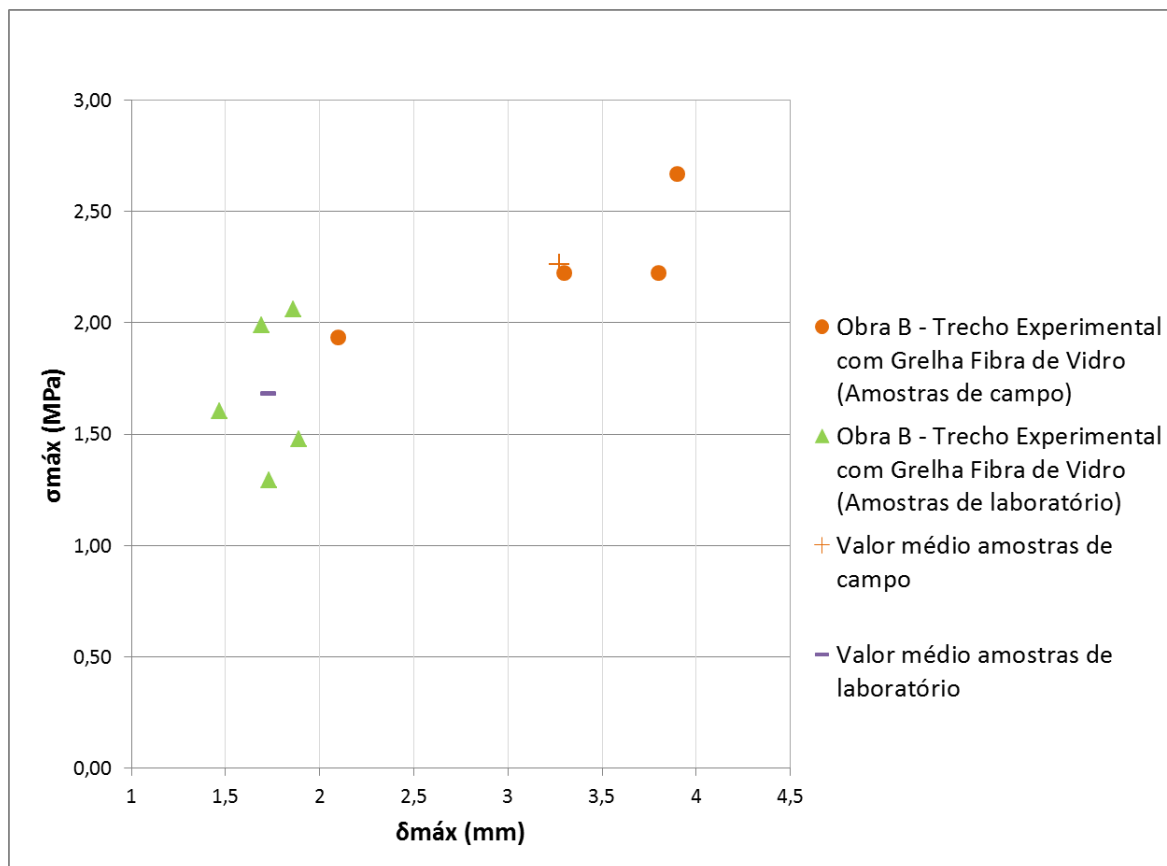


Figura 4.5 - Resultados do ensaio de *Leutner* modificado para provetes retirados em campo e produzidos em laboratório referentes ao trecho experimental da obra B

Neste caso e ao contrário do expectável, as amostras retiradas de campo do trecho experimental da obra B conduzem a resistências ao corte, em média, superiores cerca de 25,5% do que as amostras produzidas em laboratório. Salienta-se que os deslocamentos também se verificam superiores nas amostras provenientes de campo.

Considera-se que este facto poderá dever-se a alguma deficiência do processo construtivo das amostras produzidas em laboratório, visto que, como explicado no sub-capítulo 3.3.1, os provetes que compõem o conjunto produzido em laboratório para o trecho experimental da obra B foram produzidos através de duas lajetas que apresentam entre si também resultados diferentes.

Na Figura 4.6 a) e 4.6 b), apresenta-se a comparação dos resultados obtidos em campo no trecho experimental da obra B com os resultados obtidos para o mesmo pavimento construído em laboratório para a lajeta 1 e 2, respectivamente.

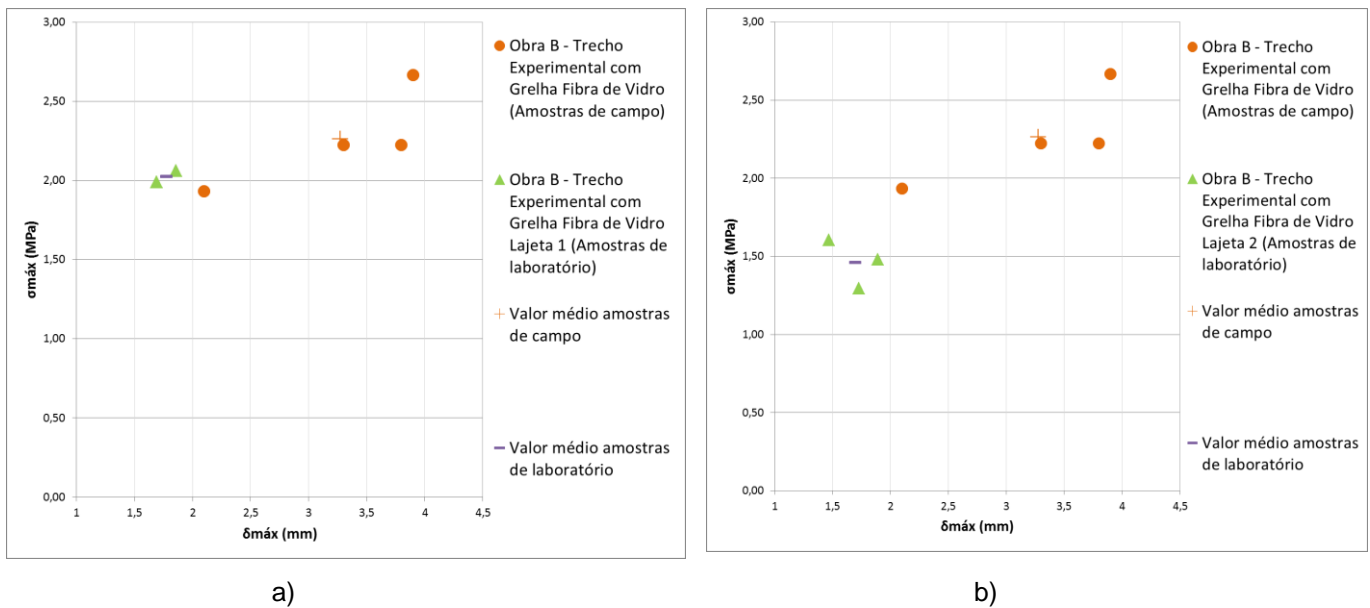


Figura 4.6 - Resultados do ensaio de *Leutner* modificado para provetes retirados em campo e produzidos em laboratório referentes ao trecho experimental da obra B, a) amostras de laboratório correspondentes à lajeta 1, b) amostras de laboratório correspondentes à lajeta 2

Comparando os resultados obtidos para as duas lajetas, tem-se que a lajeta 2 apresenta menor resistência ao corte quando comparada com a lajeta 1.

Em relação às amostras de campo estas apresentam, em média, uma resistência ao corte cerca de 10% superior quando comparadas com as amostras provenientes da lajeta 1, e cerca de 40% quando comparadas com a lajeta 2.

A Figura 4.7 apresenta a comparação de resultados do ensaio de tração *Pull-off*, para amostras recolhidas em campo correspondentes à plena via da Obra A com grelha de fibra de carbono, e para amostras recolhidas em campo correspondentes ao trecho experimental da Obra B com grelha de fibra de vidro.

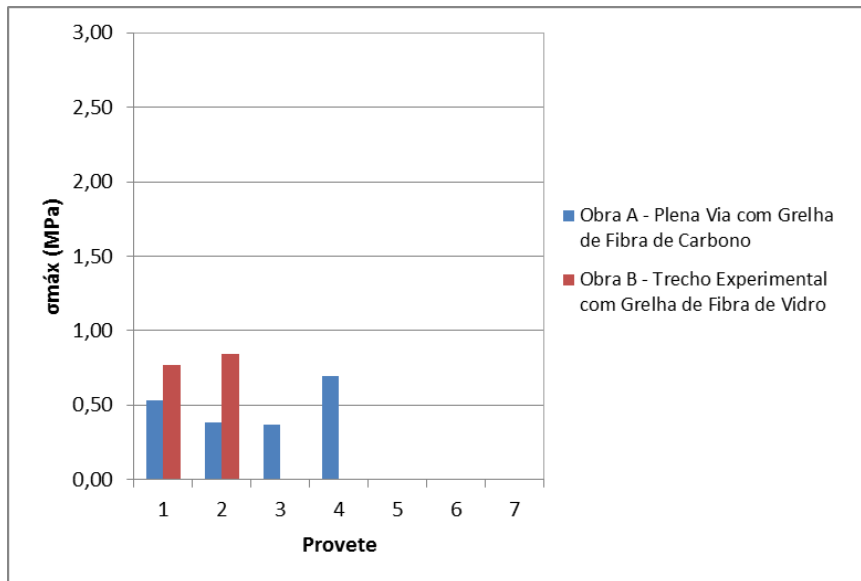


Figura 4.7 - Resultados do ensaio de *Pull-off*, para amostras recolhidas em campo correspondentes à plena via da Obra A com grelha de fibra de carbono, e ao trecho experimental da Obra B com grelha de fibra de vidro

Analisando os resultados obtidos, tem-se que a resistência à tração da interface da camada de desgaste da obra B é superior à resistência à tração da interface de camadas de base da obra A.

Pode observar-se que a resistência à tração depende do tipo de mistura betuminosa, da quantidade de rega de colagem aplicada, da tecnologia de construção utilizada e do tipo de grelha de reforço aplicada.

As Figuras 4.8 e 4.9, apresentam a comparação de resultados entre o ensaio de corte *Leutner* modificado e o ensaio de tração *Pull-off*, para amostras recolhidas em campo correspondentes à plena via da Obra A, e para amostras recolhidas em campo correspondentes ao trecho experimental da Obra B, respectivamente.

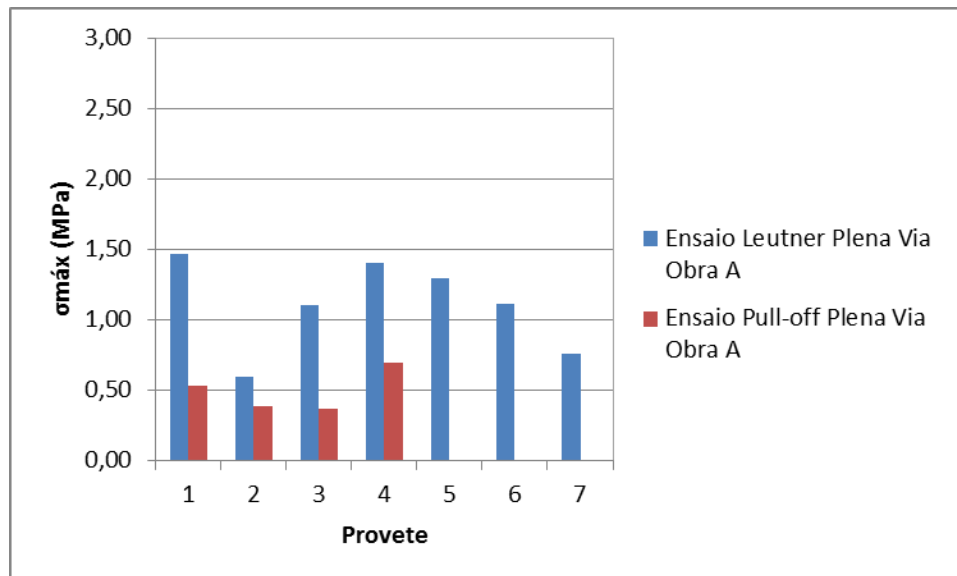


Figura 4.8 - Resultados do ensaio de *Leutner* modificado e do ensaio de *Pull-off*, para amostras recolhidas em campo correspondentes à plena via da Obra A

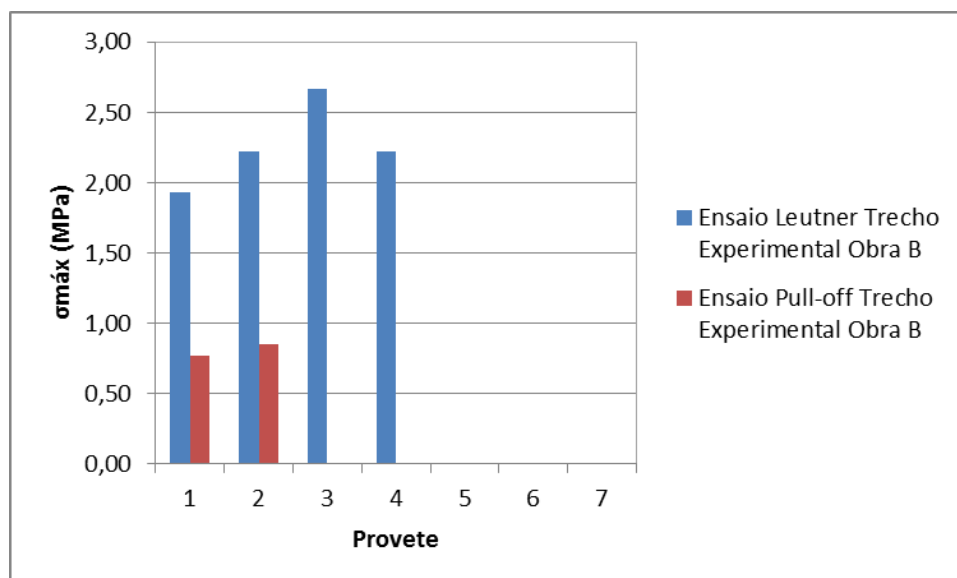


Figura 4.9 - Resultados do ensaio de *Leutner* modificado e do ensaio de *Pull-off*, para amostras recolhidas em campo correspondentes ao trecho experimental da Obra B

O único factor comum entre o ensaio de corte *Leutner* modificado e o ensaio de tração *Pull-off* foi a temperatura de ensaio de 20°C, sendo difícil efetuar uma correlação direta entre os dois ensaios, cujos procedimentos de ensaio são completamente distintos, nomeadamente a forma de aplicação da carga, o tipo de rotura e as dimensões das amostras.

Contudo é possível fazer uma análise comparativa qualitativa dos dois métodos de ensaio, da qual se retira que os valores de resistência ao corte são sempre superiores aos valores de resistência à tração, isto pode ser explicado devido ao factor de escala dos provetes ensaiados.

Considera-se ainda que a realização do ensaio de *pull-off*, com equipamento portátil, a realizar em obra, poderá constituir um meio expedito para uma primeira avaliação da ligação entre camadas.

4.2. Considerações finais

Considerando os resultados obtidos dos ensaios realizados para os vários tipos de pavimentos da obra A e da obra B, constata-se que em termos globais os pavimentos da obra B possuem um melhor desempenho em relação a forças de corte e de tração na interface de ligação entre camadas.

Fazendo uma análise global em termos médios dos valores obtidos por ensaio de corte *Leutner* modificado, como mostra a Figura 4.10, pode observar-se que o pavimento cuja interface não possui grelha de reforço é o que apresenta uma maior resistência ao corte na interface, seguido do pavimento reforçado com grelha de fibra de vidro e por último pavimento reforçado com grelha em fibra de carbono. Esta tendência verifica-se não por influência do tipo de grelha, mas pelo pavimento da obra B apresentar melhores resultados que o da obra A.

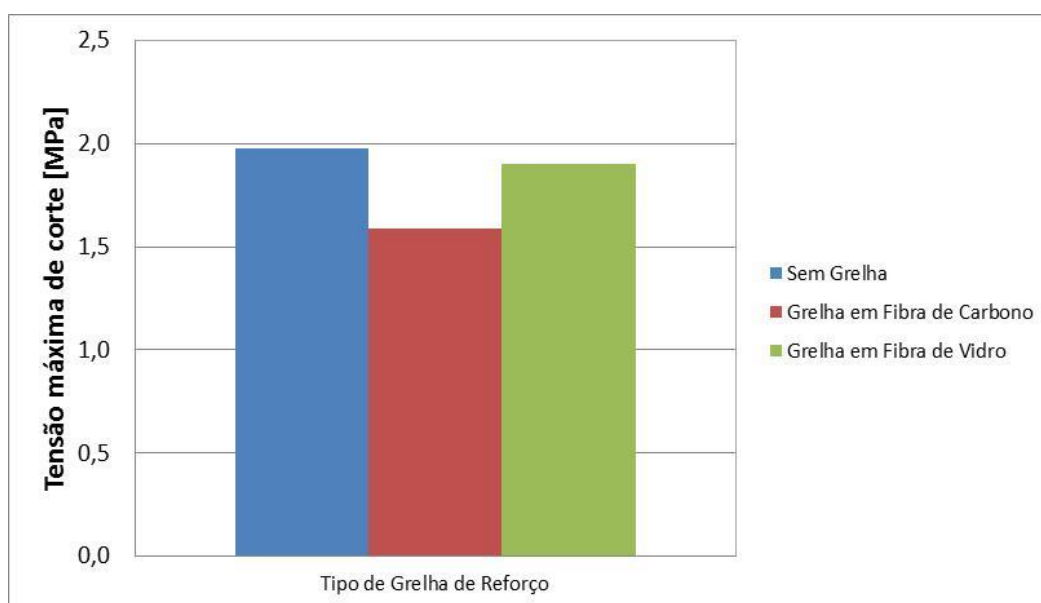


Figura 4.10 - Valores médios de tensão de corte máxima pelo método de *Leutner* modificado para interfaces com e sem presença de grelha de reforço

Da análise da Figura 4.10, pode ainda verificar-se que embora a ligação entre camadas sem grelha de reforço na interface seja melhor, é possível atingir valores semelhantes para a mesma ligação com presença de grelha se os métodos construtivos forem executados com rigor. Desta observação valida-se a utilização de grelhas antirreflexão de fendas em situações de reabilitação de pavimentos,

pois obtém-se as vantagens da não reflexão das fendas das camadas existentes para as camadas novas, e, caso se trate de grelha em fibra de carbono, também do reforço a nível mecânico que esta confere ao pavimento, sem comprometer em demasia a ligação entre camadas.

Observando agora todos os provetes experimentados em termos de forças de corte, tem-se que apenas um provete ensaiado apresentou uma resistência ao corte inferior ao limite de 12 kN exigido pelas normas Suíça e Alemã para camadas de base, sendo o seu valor de 11,6 kN correspondente ao provete ACG2, e portanto cumpre o valor de 9 kN proposto por Sutanto (2009) para resistência ao corte de camadas de base. No entanto, o valor médio registado para o conjunto de provetes que constituem esta amostra foi de 21,7 kN, o que valida portanto a qualidade da ligação entre camadas deste pavimento.

Analisando as forças de corte obtidas, em todos os resultados dos ensaios pelo método de *Leutner* modificado, agrupados por intervalos de frequência que ocorrem obtém-se a Figura 4.11.

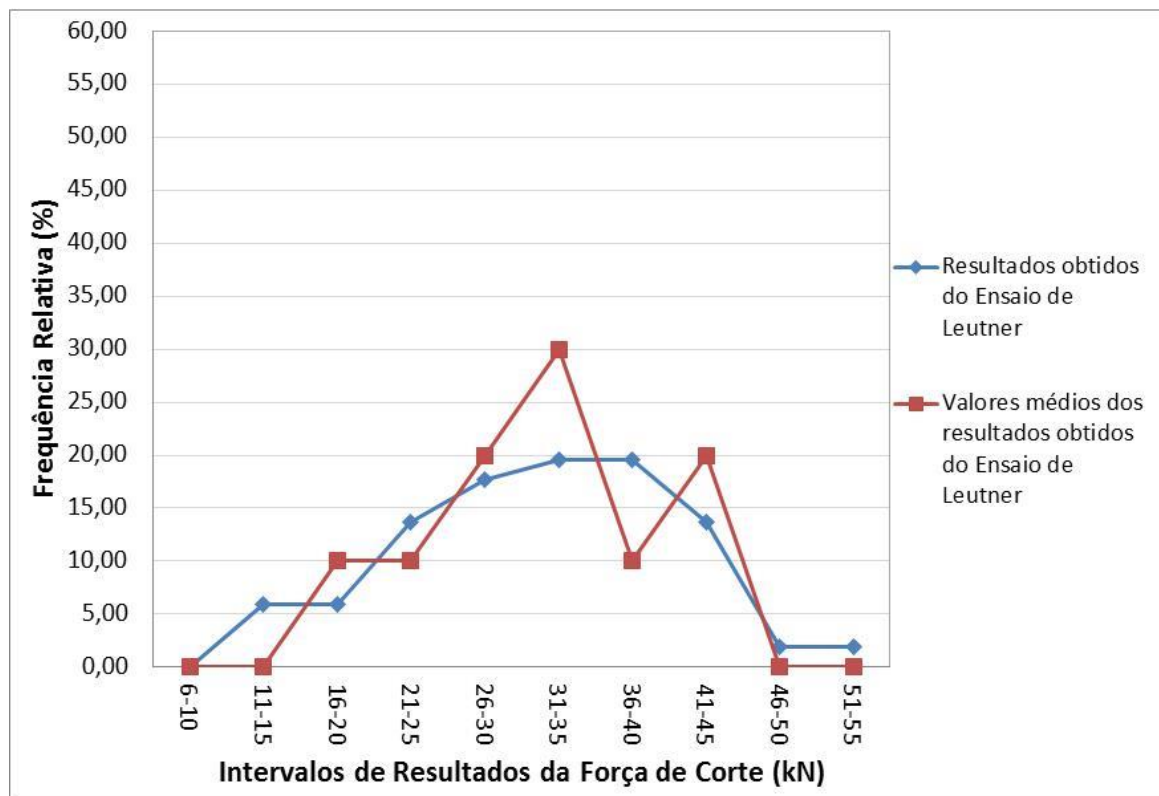


Figura 4.11 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para todos os provetes

Na Figura 4.11, tem-se representado a azul todos os resultados individuais dos vários provetes que constituem a amostra em caracterização do pavimento, e a vermelho os valores médios de cada amostra, agrupados em intervalos de ocorrência e respectiva frequência.

Analisando a Figura 4.11 tem-se, que em termos de valores médios do conjunto de caracterização do pavimento, o intervalo de força mais registrado é entre 31 kN e 35 kN, correspondendo a 30% dos casos registrados. Em termos de resultados por provetes de ensaio, cerca de 94,1% apresenta valores de resistência ao corte superiores a 16 kN, e cerca de 56,9% valores superiores a 31 kN.

Na Figura 4.12 apresentam-se as frequências dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para as camadas que não possuem grelha de reforço na interface de estudo.

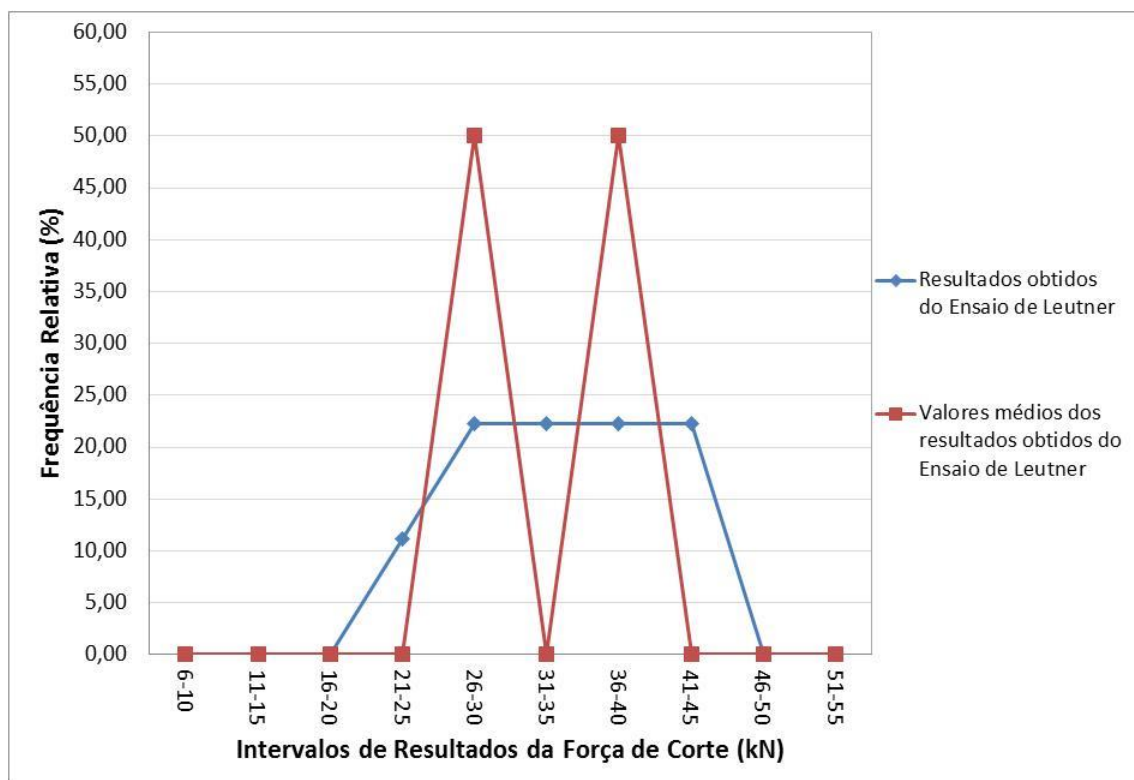


Figura 4.12 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para as camadas que não possuem grelha de reforço na interface de estudo

Analisando a Figura 4.12 tem-se que em termos de valores médios dos dois conjuntos de caracterização dos pavimentos que não possuem grelha de reforço na interface em estudo, os intervalos registrados são entre 26 kN e 30 kN, e entre 36 kN e 40 kN. Em termos de resultados por provetes de ensaio, todas as amostras apresentam valores de resistência ao corte superiores a 16 kN, e cerca de 67% apresentam valores superiores a 31 kN.

Na Figura 4.13 apresentam-se as frequências dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para as camadas que possuem grelha de reforço na interface de estudo.

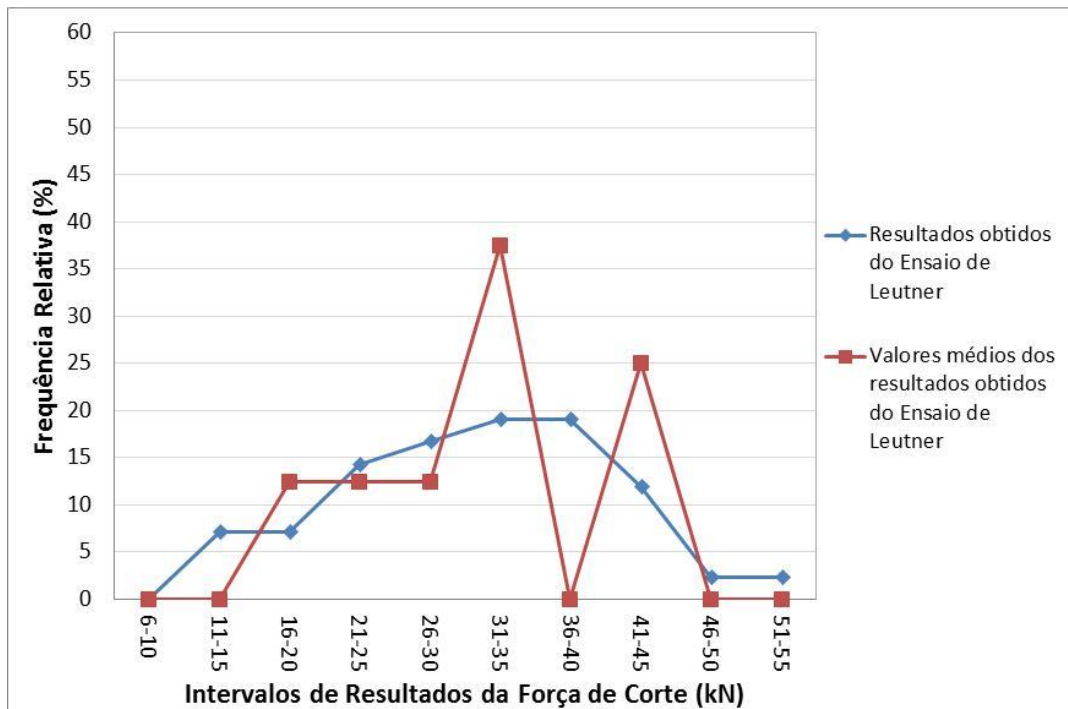


Figura 4.13 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para as camadas que possuem grelha de reforço na interface de estudo

Analisando a Figura 4.13 tem-se que em termos de valores médios dos conjuntos de amostras de caracterização dos pavimentos que possuem grelha de reforço na interface em estudo, cerca de 37,5% apresenta valores de força de corte máxima entre os 31 kN e os 35 kN. Em termos de resultados por provetes de ensaio, cerca de 93% apresentam valores de resistência ao corte superiores a 16 kN, e 54,8% apresentam valores superiores a 31 kN.

Na Figura 4.14 apresentam-se as frequências dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para as camadas que possuem grelha de reforço em fibra de carbono na interface de estudo.

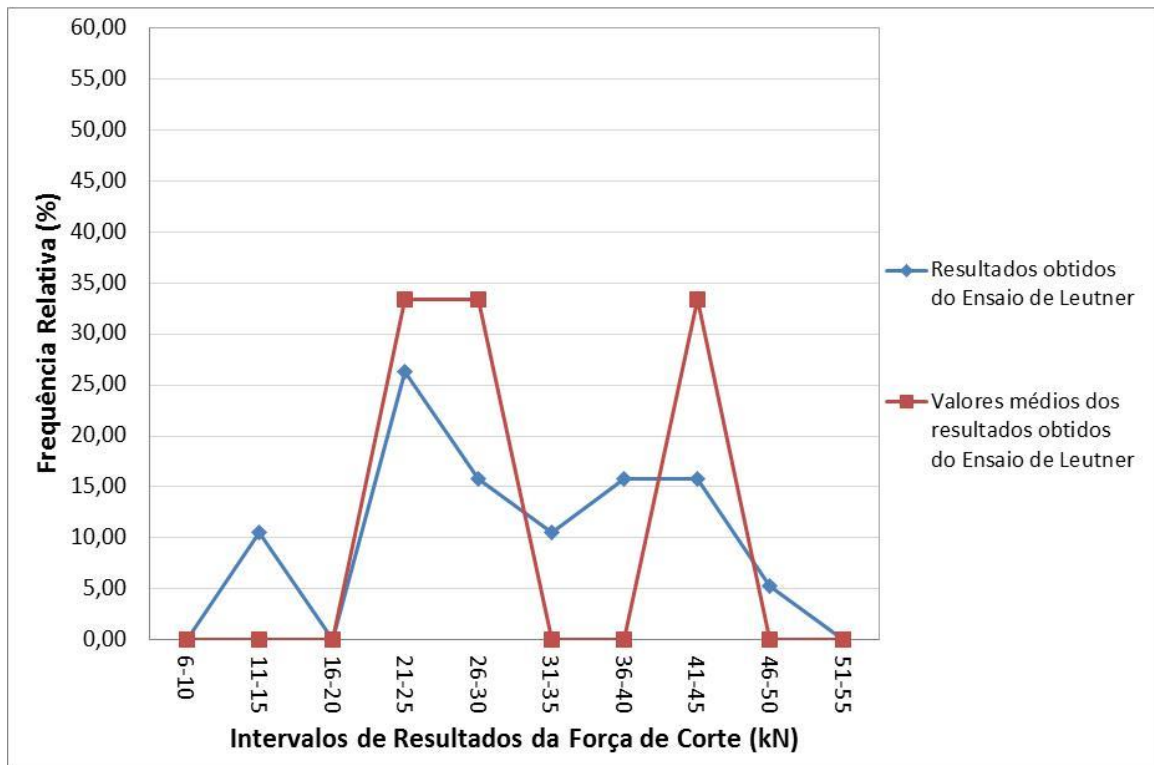


Figura 4.14 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para as camadas que possuem grelha de reforço em fibra de carbono na interface de estudo

Analisando a Figura 4.14 tem-se que em termos de valores médios dos conjuntos de amostras de caracterização dos pavimentos que possuem grelha de reforço em fibra de carbono na interface em estudo se situam nos intervalos entre 21 kN a 25 kN, 26 kN a 30 kN, e 41 kN a 45 kN, todos com cerca de 33% de ocorrência. Em termos de resultados por provetes de ensaio, cerca de 89,5% apresentam valores de resistência ao corte superiores a 16 kN, e 47,4% apresentam valores superiores a 31 kN.

Na Figura 4.15 apresentam-se as frequências dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para as camadas que possuem grelha de reforço em fibra de vidro na interface de estudo.

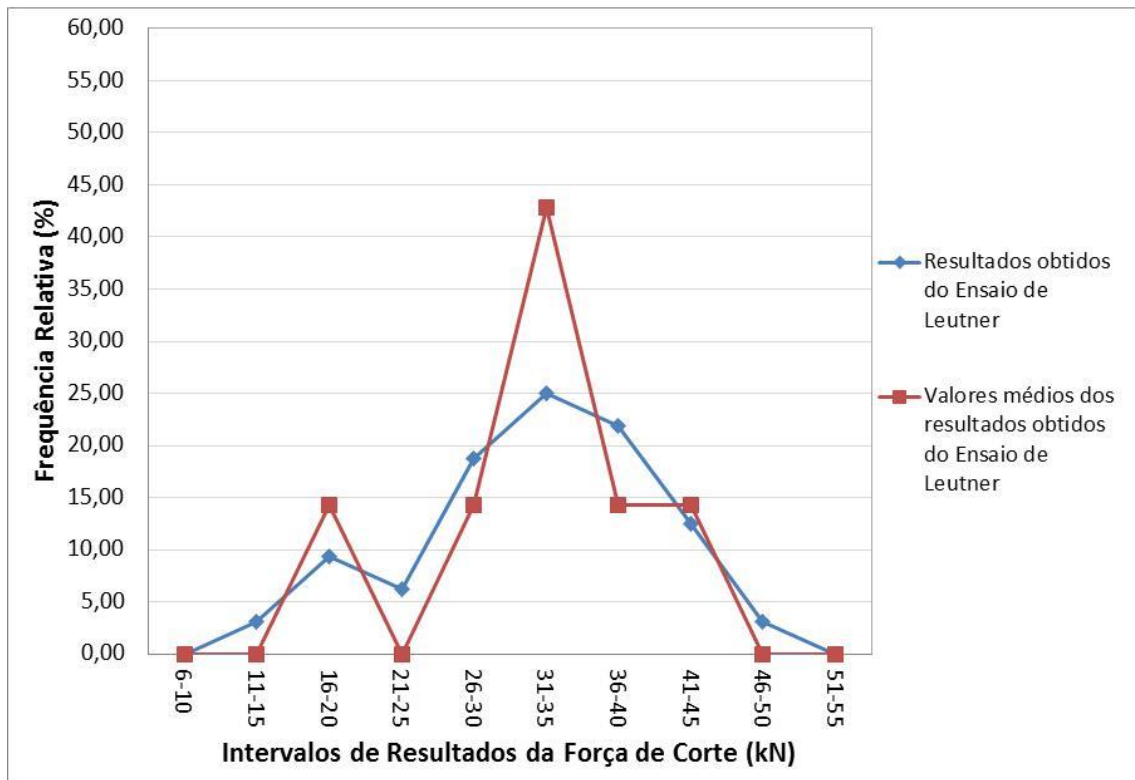


Figura 4.15 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para as camadas que possuem grelha de reforço em fibra de vidro na interface de estudo

Analisando a Figura 4.15 tem-se que em termos de valores médios dos conjuntos de amostras de caracterização dos pavimentos que possuem grelha de reforço em fibra de vidro na interface em estudo, cerca de 43% apresenta valores de força de corte máxima entre os 31 kN e os 35 kN. Em termos de resultados por provetes de ensaio, cerca de 97% apresentam valores de resistência ao corte superiores a 16 kN, e 62,5% apresentam valores superiores a 31 kN.

Na Figura 4.16 apresentam-se as frequências dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para as camadas que possuem a camada subjacente da interface de estudo fresada.

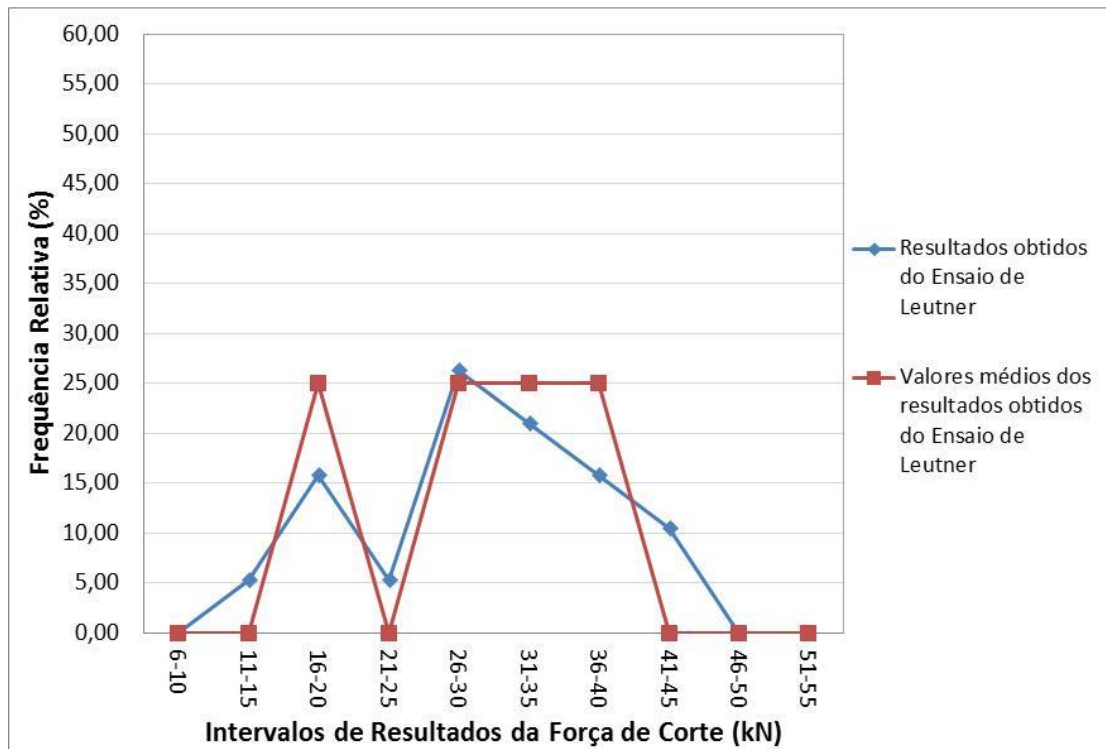


Figura 4.16 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para as camadas que possuem a camada subjacente da interface de estudo fresada

Analisando a Figura 4.16 tem-se que em termos de valores médios dos conjuntos de amostras de caracterização dos pavimentos que possuem a camada subjacente da interface de estudo fresada, estes apresentam uma grande dispersão de resultados. Em termos de resultados por provetes de ensaio, cerca de 94,7% apresentam valores de resistência ao corte superiores a 16 kN, e 47,4% apresentam valores superiores a 31 kN.

Na Figura 4.17 apresentam-se as frequências dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para as camadas que possuem a camada subjacente da interface de estudo nova.

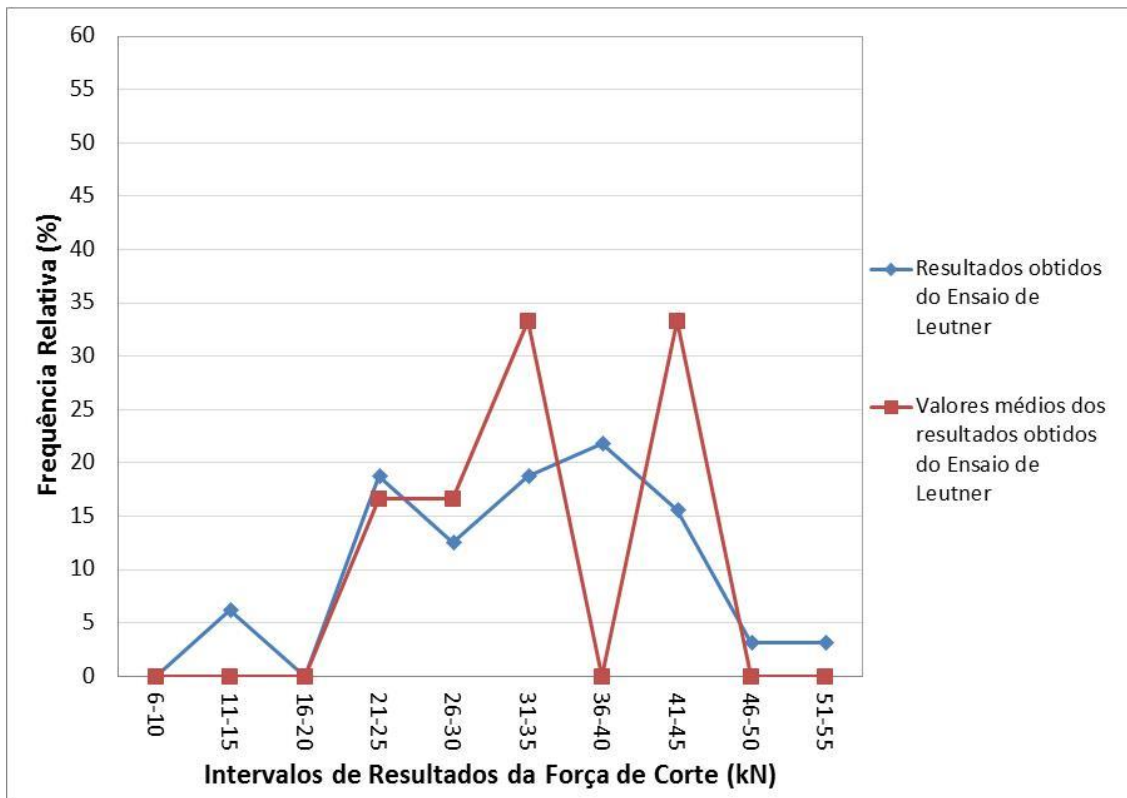


Figura 4.17 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para as camadas que possuem a camada subjacente da interface de estudo nova

Analisando a Figura 4.17 tem-se que em termos de valores médios dos conjuntos de amostras de caracterização dos pavimentos que possuem a camada subjacente da interface de estudo nova, os intervalos registados são entre 31 kN a 35 kN, e entre 41 kN a 45 kN. Em termos de resultados por provetes de ensaio, cerca de 93,8% apresentam valores de resistência ao corte superiores a 16 kN, e 62,5% apresentam valores superiores a 31 kN.

Na Figura 4.18 apresentam-se as frequências dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para a interface de estudo com ligação a camadas de base.

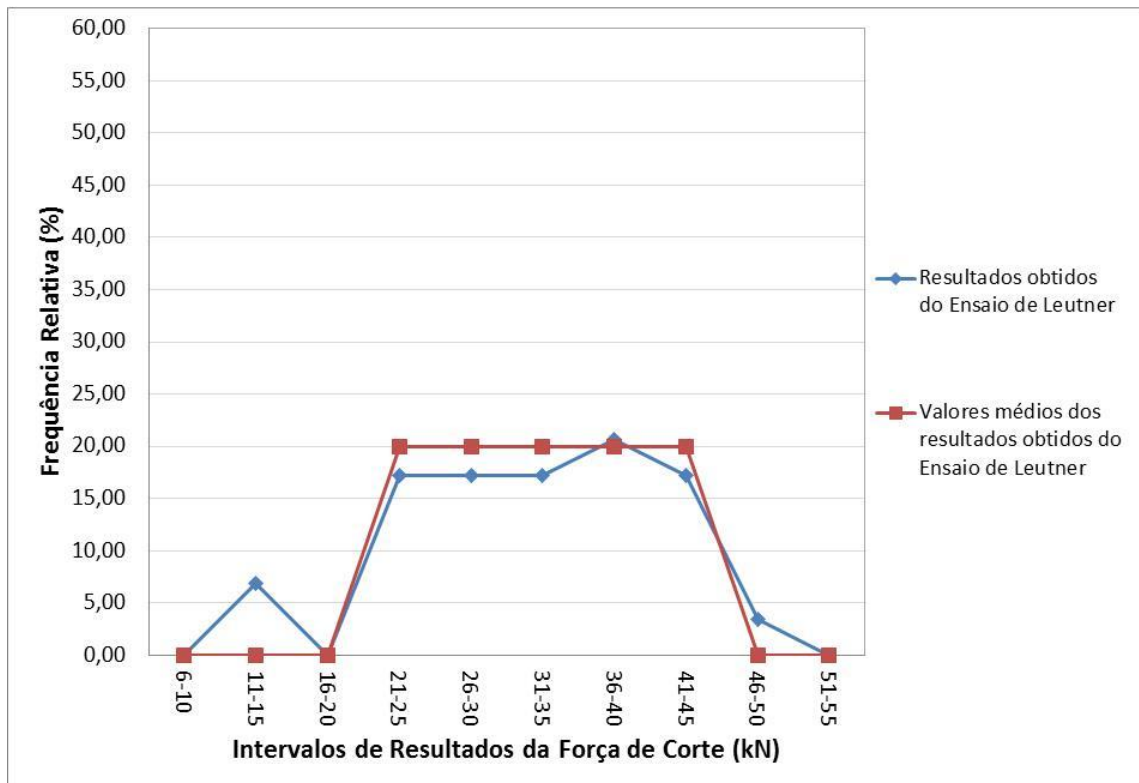


Figura 4.18 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para a interface de ligação a camadas de base

Analisando a Figura 4.18 tem-se que em termos de valores médios dos conjuntos de amostras de caracterização dos pavimentos que possuem a interface de estudo com ligação a camadas de base, estes apresentam uma grande dispersão de resultados. Em termos de resultados por provetes de ensaio, cerca de 93,1% apresentam valores de resistência ao corte superiores a 16 kN, e 58,6% apresentam valores superiores a 31 kN.

Na Figura 4.19 apresentam-se as frequências dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para a interface de estudo com ligação a camadas de desgaste.

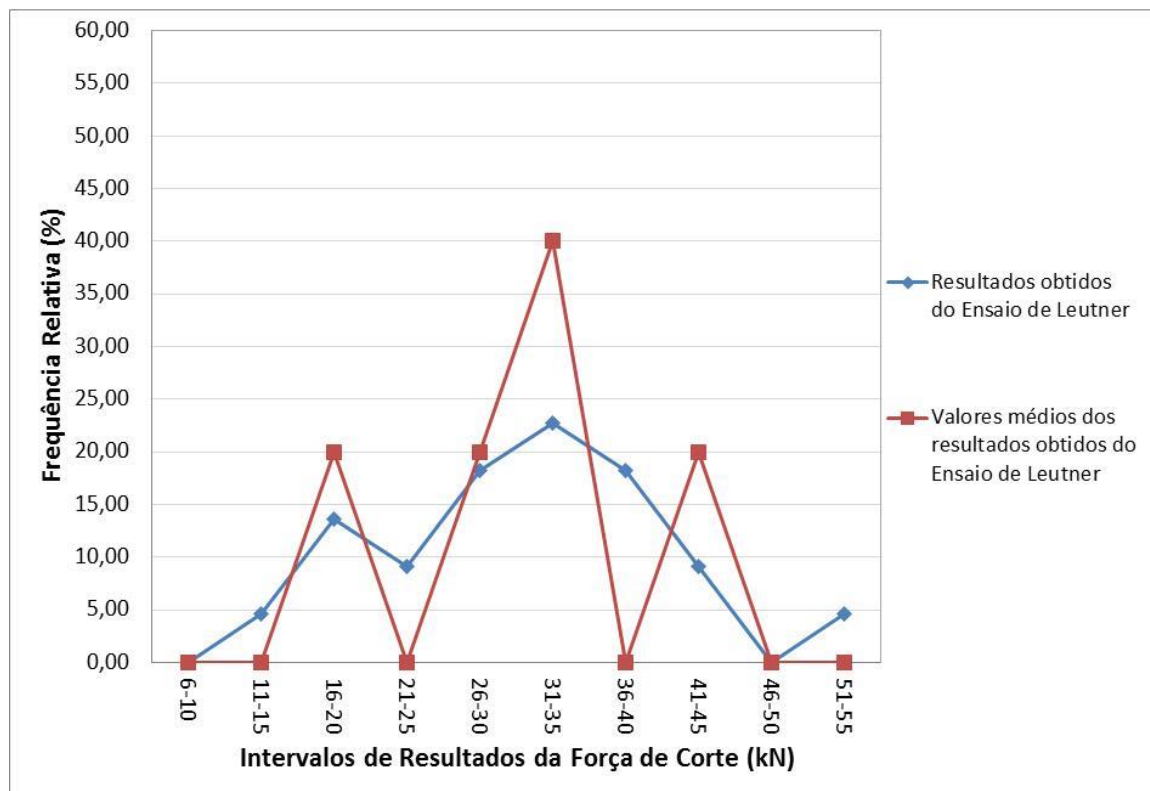


Figura 4.19 - Frequência dos resultados obtidos no ensaio de *Leutner* modificado para a interface de ligação a camadas de desgaste

Analisando a Figura 4.19 tem-se que em termos de valores médios dos conjuntos de amostras de caracterização dos pavimentos que possuem interface de estudo com ligação a camadas de desgaste, cerca de 40% apresenta valores de força de corte máxima entre os 31 kN e os 35 kN. Em termos de resultados por provetes de ensaio, cerca de 95,5% apresentam valores de resistência ao corte superiores a 16 kN, e 54,6% apresentam valores superiores a 31 kN.

Analisando os valores apresentados, tem-se que entre 89,5% a 100% dos provetes apresentam uma resistência ao corte superior ou igual a 16 kN, e que entre 47,4% a 67% dos provetes ensaiados apresentam uma resistência ao corte superior ou igual a 31 kN.

Em suma, dadas as características das amostras dos pavimentos analisadas serem constituídas por misturas betuminosas diferentes, verifica-se a presença ou não de grelha de reforço na interface de ligação entre camadas e taxas de aplicação de rega de colagem diferentes, consegue-se varrer um grande conjunto de condições que influenciam a ligação entre camadas e com isso propor valores de referência para ligações entre camadas de base e ligações entre camadas de desgaste, tendo apenas como requisito o uso de uma rega de colagem em emulsão betuminosa termoaderente modificada com polímeros no caso de utilização de grelhas de reforço antirreflexão de fendas na interface das camadas betuminosas.

Considera-se assim que, com base nos valores obtidos no presente estudo, os limites mínimos de 12 kN para a ligação entre camadas de base, e de 15 kN para ligação entre camadas de desgaste, proposto nas normas Suíça (SN 640 430:2008) e Alemã (ZTV Asphalt – StB 07) são cumpridos.

Tendo em conta o limite mínimo proposto por Sutanto (2009) de 18 kN para ligação entre camadas de desgaste e os resultados obtidos neste estudo, torna-se necessário aprofundar esta investigação para propor valores de referência para a ligação entre camadas betuminosas de pavimentos flexíveis em Portugal, pois considera-se que os limites mínimos para camadas de base e de desgaste poderão ser mais exigentes, deixando os valores obtidos margem para recomendar valores mais elevados.

5. CONCLUSÕES

5.1. Conclusões finais

Esta dissertação teve como objectivo o estudo da ligação entre camadas de pavimentos flexíveis através do ensaio de corte, de acordo com a metodologia do ensaio de *Leutner* modificado, e do ensaio de tração *Pull-off*, tendo sido realizados ensaios sobre provetes obtidos de duas obras reais, correspondentes a um pavimento aeroportuário e um pavimento rodoviário.

O presente estudo teve início com uma revisão da literatura, onde foi feita uma breve introdução sobre a constituição de pavimentos flexíveis e a importância deste ser construído em camadas, foi abordada a importância da ligação entre camadas num pavimento, onde se contextualizou a própria ligação entre camadas e a utilização de rega de colagem com emulsão betuminosa, abordou-se a reabilitação de pavimentos com recurso a grelhas pré-betuminadas antirreflexão de fendas e o processo construtivo de aplicação das mesmas. Posteriormente foram apresentados os factores que afetam a ligação entre camadas do pavimento, e os métodos de ensaio mais correntes utilizados para avaliar essa ligação.

Dentro dos métodos existentes para avaliar a ligação entre camadas, foi feita uma breve abordagem sobre a existência de métodos de ensaio não destrutivos e destrutivos, sendo que para estes últimos foi feita uma descrição mais detalhada dos três métodos de ensaios mais correntes (ensaio de corte, de tração e de *torque*).

Para o ensaio de corte, a metodologia seguida foi a de *Leutner* modificado, à luz do preconizado pelo *Appendix A.1 do Manual of Contract for Highway Works* (2008), visto não existir ainda norma europeia em vigor, mas tendo em consideração o projeto de norma prEN 12697-48 que está em preparação pelo European Committee for Standardization CEN/TC 227.

Para o ensaio de tração *Pull-off*, dado actualmente não haver normalização europeia em vigor para este ensaio em pavimentos betuminosos, seguiu-se a metodologia preconizada no projeto de norma prEN 12697-48 e a metodologia seguida por outros autores nos seus estudos com equipamentos de ensaio portáteis.

A campanha experimental decorreu sobre provetes provenientes de duas obras distintas, identificadas por obra A e obra B. A obra A com dois trechos com a mesma mistura betuminosa e as mesmas camadas em estudo, mas com taxas de aplicação de rega de colagem diferentes; e a obra B com dois trechos com constituições diferentes de pavimento em termos de mistura betuminosa, taxa de aplicação de rega de colagem e camadas em estudo; mas ambos com aplicação de grelha pré-betuminada de reforço antirreflexão de fendas em fibra de carbono e fibra de vidro, respectivamente.

Os resultados obtidos pelo ensaio de *Leutner* modificado, permitem concluir que a introdução de grelha de reforço na interface de estudo diminui as características da ligação entre camadas, visto ser um elemento externo ao conjunto, cujos materiais e propriedades funcionam de maneira diferente das misturas betuminosas, promovendo uma perda parcial de contacto entre as misturas betuminosas. No caso observado neste estudo a diminuição da resistência ao corte da interface foi de 14,8%, uma perda de resistência ao corte menor que o obtido por Marcelino et al. (2013) de 34,7%, e por Raab e Partl (2004) de 57,1%.

Os valores obtidos neste estudo demonstram que embora a ligação entre camadas sem a presença de grelhas de reforço seja sempre dotada de uma maior resistência a forças de corte, e consequente melhor ligação entre camadas, é possível obter resistências ao corte semelhantes no caso de aplicação de grelhas de reforço, validando assim a utilização destas grelhas em relação aos seus benefícios versus impacto na estrutura do pavimento.

Na análise dos dois trechos da obra A com o mesmo tipo de mistura betuminosa constituinte dos pavimentos, observou-se que uma maior taxa de aplicação de rega de colagem levava a um aumento significativo da resistência ao corte da interface das camadas em estudo. Depreende-se que uma maior taxa de aplicação de rega de colagem leva a melhores desempenhos na ligação entre camadas.

No entanto esta melhoria é crescente até ser atingida a taxa de aplicação ótima, pois um excesso de aplicação de rega de colagem provoca a perda de atrito entre as duas camadas contíguas provocando uma superfície de deslizamento. Esta quantidade ótima de taxa de aplicação depende do tipo de material utilizado na rega de colagem, do tipo de mistura betuminosa que compõe as camadas do pavimento e do respectivo processo construtivo. Este facto pode comprovar-se pelos resultados obtidos para a comparação da plena via da obra B com o trecho experimental da mesma obra, onde se observou que o pavimento que possuía uma menor taxa de aplicação de rega de colagem tinha um melhor desempenho quanto à resistência a forças de corte aplicadas na interface das camadas.

A influência da qualidade do processo construtivo na ligação entre camadas também é evidenciada neste estudo, sendo que se verificou para os trechos experimentais das duas obras e para as amostras realizadas em laboratório da obra A, uma maior resistência ao corte.

Em suma, pode concluir-se destes casos que a ligação entre camadas depende do tipo de mistura betuminosa que compõe as camadas da interface em estudo, da taxa de aplicação da rega de colagem e do processo construtivo dessas camadas betuminosas.

Quanto às amostras previamente ensaiadas no Wheel Tracking, onde se pode simular o efeito que a passagem dos rodados dos veículos tem sobre a ligação entre as camadas betuminosas, verificou-se

um decréscimo da resistência ao corte da interface. Este facto era o espectável e é explicado pelo facto da passagens dos veículos induzirem forças/tensões de corte que vão degradando a qualidade da ligação entre camadas.

Em relação ao ensaio de *Pull-off*, dada a pouca representatividade da amostra, apenas se pode concluir que a resposta da interface das camadas do pavimento em termos de tensões de tração é menor que a mesma resposta para tensões de corte. Este facto é concordante com os resultados obtidos por Raab e Partl (2004). No presente estudo observa-se que as tensões de tração são entre 65,9% a 55,3% menores que as tensões de corte verificadas para o mesmo pavimento e para a mesma temperatura de ensaio de 20°C. Analisando os valores obtidos por Raab e Partl (2004) observa-se uma tendência semelhante, sendo que nesse caso as tensões de tração são entre 58,6% a 56,8% menores que as tensões de corte verificadas para o mesmo pavimento e para a mesma temperatura de ensaio de 20°C. Esta análise carece de mais estudos para se confirmar alguma tendência de relação entre os dois métodos.

Conclui-se que o ensaio de *Pull-off* com equipamentos portáteis é vantajoso pela possibilidade de execução *in situ*, podendo fornecer de uma forma expedita, valores indicativos sobre a qualidade da ligação entre camadas do pavimento.

O facto de as amostras dos pavimentos das duas obras em estudo apresentarem alguma dispersão entre si, pois as misturas betuminosas, as camadas em análise, e as taxas de aplicação de regas de colagem são diferentes, e também por possuírem grelhas de reforço antirreflexão de fendas de materiais diferentes, torna difícil obter conclusões sobre como cada uma destas características isoladamente influencia a ligação entre camadas do pavimento betuminoso. No entanto os valores de referência para a resistência ao corte da interface de ligação propostos por Sutanto (2009), 0,5 MPa para ligações a camadas de base (9 kN) e 1 MPa para ligações a camadas de desgaste (18 kN), e nas normas Suíça (SN 640 430:2008) e Alemã (ZTV Asphalt – StB 07), 12 kN para ligações a camadas de base e 15 kN para ligações a camadas de desgaste, referem-se apenas à resistência ao corte mínima que aquela interface deve apresentar, não especificando tipos de misturas betuminosas, uso de rega de colagem, tipo e taxa de aplicação de rega de colagem no caso de esta existir, e materiais de reforço na interface. Atendendo a este facto, e à variabilidade de pavimentos que constituem este estudo, propuseram-se valores de referência de resistência ao corte mínima que uma interface deve apresentar para a ligação entre camadas betuminosas de um qualquer pavimento.

Com este estudo podemos validar os mínimos impostos pelas normas supracitadas para os pavimentos betuminosos utilizados em Portugal, exigindo a aplicação de uma emulsão betuminosa modificada com polímeros e termoaderente para o caso de aplicação de grelhas de reforço antirreflexão de fendas, sendo que para camadas de base o valor mínimo deve ser de 12 kN e para camadas de desgaste 15 kN.

No entanto, mais testes devem ser realizados para propor valores de referência para a ligação entre camadas betuminosas de pavimentos flexíveis em Portugal, pois pelos resultados obtidos neste estudo considera-se haver margem para uma maior exigência nos limites mínimos de resistência ao corte das interfaces de camadas betuminosas.

5.2. Desenvolvimentos futuros

Com o objectivo de dar continuidade ao tema apresentado nesta dissertação, considera-se importante a continuação deste estudo com novos ensaios laboratoriais, de modo a validar os resultados obtidos, bem como a aprofundar o conhecimento nesta área.

Por conseguinte, apresentam-se as seguintes sugestões para desenvolvimentos futuros:

- Realizar o mesmo estudo para a mesma composição de pavimento, variando as taxas de aplicação de rega de colagem;
- Realizar o mesmo estudo utilizando emulsões betuminosas diferentes;
- Para o mesmo pavimento utilizar diferentes tipos de grelha de reforço;
- Caracterizar vários tipos de pavimentos para estabelecer parâmetros de referência para a maioria das soluções de pavimento utilizadas em Portugal;
- Realizar o ensaio de *Pull-off* para amostras que não possuam grelha de reforço como grupo de referência e comparar com o mesmo ensaio realizado a amostras com grelhas diferentes e com taxas de aplicação diferentes, mantendo a mistura betuminosa constituinte das camadas;
- Realizar o mesmo estudo com o método *Torque Bond Test*, e correlacionar com o método de *Leutner* modificado e com o *Pull-off test*;
- Realizar o ensaio de tração *Pull-off* para amostras de pavimento que não possuam grelha de reforço;
- Realizar ensaio *Pull-off* em amostras fabricadas em laboratório e comparar com ensaio em amostras recolhidas em campo;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asphalt Academy (2008). Technical Guideline: Asphalt reinforcement for road construction. Asphalt Academy, Pretoria – South Africa.

Bernucci, L., Motta, L., Ceratti, J., Soares, J. (2010). Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros. Gráfica Imprinta, 3ª Reimpressão, Rio de Janeiro.

Betunel (2015). <http://betunel.com.br/betunews/?p=5> [consult. 10 jul. 2015]

Branco, F., Pereira, P., Picado Santos, L. (2011). Pavimentos rodoviários. Coimbra: Edições Almedina.

Brás, M. (2012). Validação estrutural dos pavimentos flexíveis indicados no “Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.

Canestrari, F., Ferrotti, G., Partl, M., Santagata, E. (2005). Advanced testing and characterization of interlayer shear resistance. Transportation research record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1929, pp 69-78.

Capitão, S. D., Picado Santos, L., Pais, J. (2004). Deformabilidade, comportamento à fadiga e resistência à deformação permanente de misturas betuminosas de alto módulo para camadas de base. 3º Congresso rodoviário português, Lisboa.

CEPSA (2006). Manual de Pavimentação. CEPSA Portuguesa, Barcelona.

Chandra, B. (2007). Evaluation of interface bond condition between two bituminous layers. Civil Engineering Department, Kanpur.

Chen, J., Huang, C. (2010). Effect of surface characteristics on bonding properties of bituminous tack coat. Transportation Research Record: Journal of the transportation research board, No. 2180, pp142-149.

EP (2011). Caderno de encargos tipo obra 14.03 - Pavimentação. Estradas de Portugal, Almada.

FHWA (2000). Tensile bond strenght of a high performance concrete bridge deck overlay. Federal Highway Administration Field test report, Sturgis, South Dakota.

Ferroti, G., Canestrari, F., Virgili, A., Grilli, A. (2011). A strategic laboratory approach for the performance investigation of geogrids in flexible pavements. Geotextiles and geomembranes, 25, pp. 2343-2348.

Ferroti, G., Canestrari, F., Pasquini, E., Virgili, A. (2012). Experimental evaluation of the influence of surface coating on fiberglass geogrid performance in asphalt pavements. Geotextiles and geomembranes, 34, pp. 11-18.

Francisco, A. (2012). Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.

Freire, A. C., Marcelino, P. (2014). Estudo de grelhas para reforço de pavimentos. Apresentação 2º Seminário S&P Clever Reinforcement, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Guimarães, P. (2013). Estudo da aderência entre camadas asfálticas de pavimentos. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Guerra, A. (2015). Caracterização reológica e avaliação da resistência à fadiga de mastiques betuminosos com o reómetro de corte dinâmico. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e de Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Almada.

InIR (2009). Directivas para concepção de pavimentos – Critérios de dimensionamento. Documento base, Instituto de Infraestruturas Rodoviárias, I.P.

Lancaster, I. (2009). Bond Coats. Presentation for Nynas UK AB.

Marcelino, P., Freire, A. C., Costa, P. (2013). Avaliação da interface entre camadas ligadas com aplicação de grelhas de reforço de pavimentos pelo método de Leutner modificado. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Menezes, M. (2008). Estudo das características de superfície de pavimentos rodoviários para análise da segurança do tráfego. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Miranda (2015). <http://pavimentosrodoviarios.blogspot.pt/search/label/Defini%C3%A7%C3%B5es> [consult. 12 ago. 2015]

Mohammad, L., Raqib, M., Huang, B. (2002). Influence of asphalt tack coat materials on interface shear strength. Transportation research record 1789 journal of the Transportation Research Board, Paper No. 02-3301

Muench, S., Moomaw, T. (2008). De-Bonding oh hot mix asphalt pavements in Washington state: An initial investigation. Final Technical Report, Transportation Northwest, University of Washington.

Nabais, J. (2015). Avaliação da aderência ao suporte de rebocos de terra. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e de Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Almada.

OZ (2015). <http://www.oz-diagnostico.pt/fichas/1F%20024.pdf> [consult. 25 ago. 2015]

Palmeira, E., Antunes, L. (2010). Large scale tests on geosynthetic reinforced unpaved roads subjected to surface maintenance. Geotextiles and geomembranes, 28, pp. 547-558.

Partl, M., Raab, C. (1999). Shear adhesion between top layers of fresh asphalt pavements in Switzerland. Proceedings of 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa.

Patel, N. (2010). Factors affecting the interface shear strength of pavement layers. Thesis submitted to the graduate faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering, Louisiana.

PavInt (2015). <http://www.pavementinteractive.org/article/slippage-cracking/> [consult. 5 set. 2015]

Plug, C., Bondt, A. (2010). Adhesion of reinforcement grids in asphalt overlays. 5th World congress on emulsions, Lyon, France.

Probigalp (2015). <http://www.probigalp.pt/frame1.php> [consult. 21 set. 2015]

Quaresma, L. (2014). Pavimentos rodoviários – Textos de apoio. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Almada.

Raab, C., Partl, M. (2004). Effect of tack coats on interlayer shear bond of pavements. Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, South Africa.

Raab, C., Partl, M. (2004). Interlayer shear performance: Experience with different pavement structures. Proceedings of 3th Eurobitume Eurasphalt Congress, pp. 535-545.

RILEM (2012). Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical committee 206-ATB, Part I, M. et al Editors, Springer.

Silva, H. (2005). Caracterização do masticado betuminoso e da ligação agregado-masticado – Contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga.

Siriwardane, H., Gondle, R., Kutuk, B. (2010). Analysis of Flexible Pavements Reinforced with geogrids. *Geotech Geol Eng*, 28, pp. 287-297.

Sutanto, M. H. (2009). Assessment of bond between asphalt layers. Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy, Nottingham.

Sutradhar, B. (2012), Evaluation of bond between bituminous pavement layers, Thesis of master of technology, Department of civil engineering, National Institute of Technology, Rourkela.

Scherer, J. (2007). Reforço com grelhas de fibra de carbono em pavimentos rodoviários, aumento da vida útil e redução de custos de manutenção. S&P Clever Reinforcement Company AG, Switzerland.

S&P (2012). S&P Reforço de asfalto com grelha revestida de betume – Carbophalt/Glasphalt. Texto de especificação, S&P Clever Reinforcement Company.

Vaitkus, A., Čygas, D., Laurinavičius, A., Vorobjovas, V., Kleizienė, R. (2012). Research of asphalt layer bonding in Lithuanian pavement structures. *Gradevinar*, 64 (11), pp. 915-921.

Zamora-Barraza, D., Calzada-Peréz, M., Castro-Fresno, D., Veja-Zamanillo, A. (2011). Evaluation of anti-reflective cracking systems using geosynthetics in the interlayer zone. *Geotextiles and geomembranes*, 29, pp. 130-136.

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

ASTM D4541 (2009). Standard test method for Pull-off strength of coatings using portable adhesion testers. United States.

DNER-ES 307/97 (1997). Pavimentação - Pintura de ligação. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.

EN 12697-22 (2003). Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt – part 22: Wheel Tracking. Brussels.

EN 12697-33 (2003). Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt – part 33: Specimen prepared by roller compactor. Brussels.

EN 13924 (2006). Bitumen and bituminous binders. Specification for hard paving grade bitumens. Brussels.

EN 14023 (2010). Bitumen and bituminous binders. Specification framework for polymer modified bitumens. Brussels.

MCHW Series 900 (2008). Method for laboratory determination of interface properties using the modified Leutner shear test. Manual of Contract Documents for Highway Works, Volume 1, series 900 – Road Pavements-Bituminous bond materials.

Norme Suisse SN 640430:2013 – Enrobés bitumineux compactés Conception, exécution et exigences relatives aux couches en place, Recherche et normalisation en matière de route et de transports, Zürich.

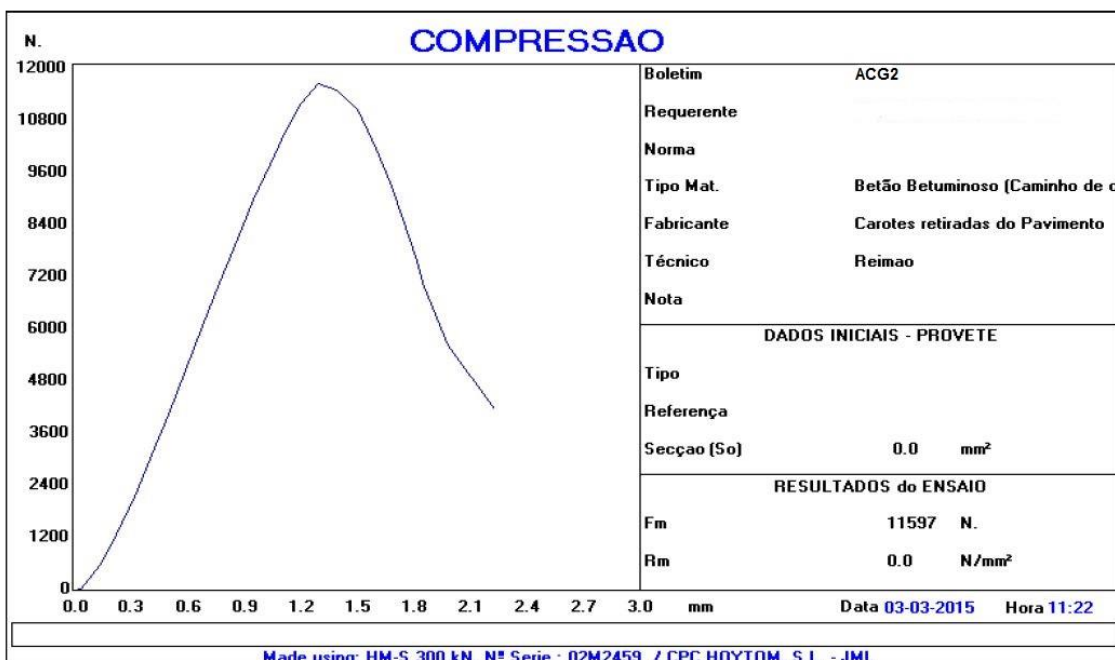
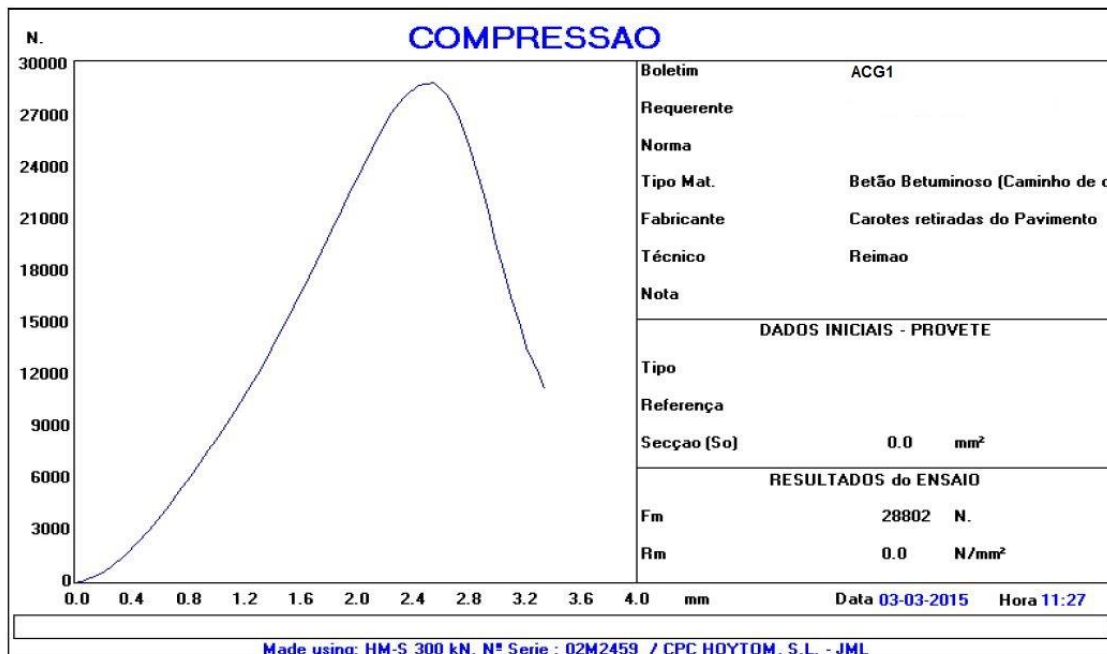
NP EN 12591 (2011). Betumes e ligantes betuminosos – Especificações para betumes de pavimentação. IPQ, Caparica, Portugal.

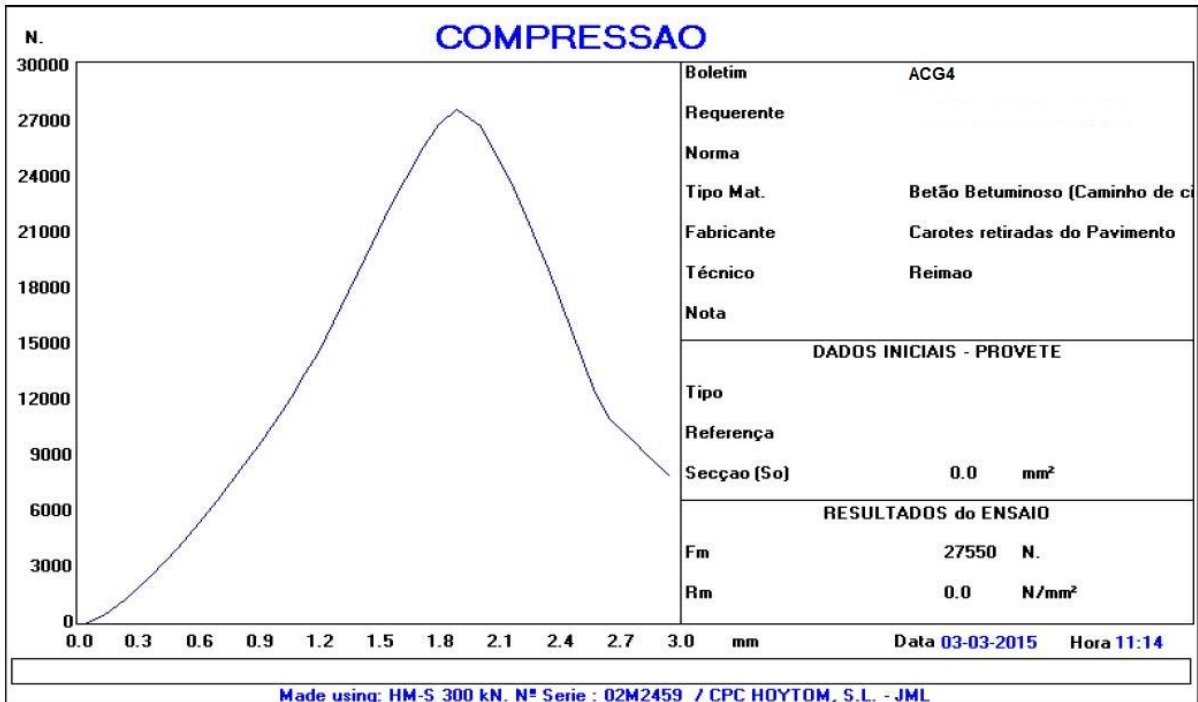
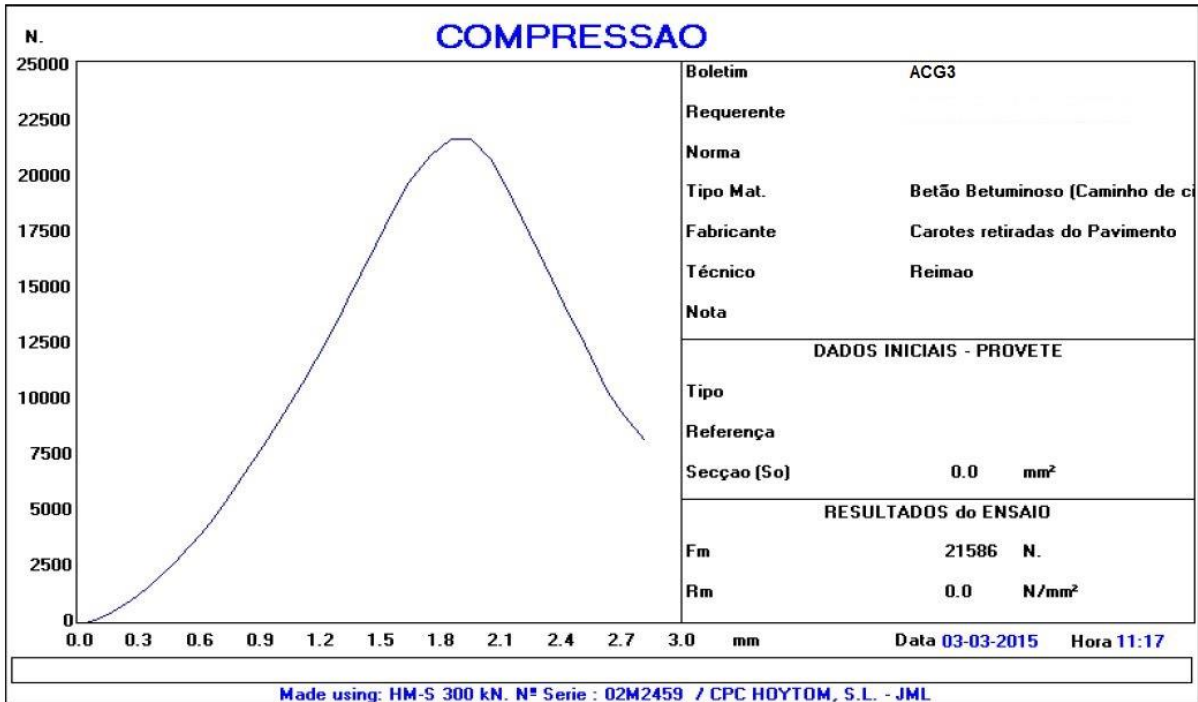
NP EN 13108-1 (2011). Misturas betuminosas – Especificações dos materiais – Parte 1: Betão betuminoso. IPQ, Caparica, Portugal.

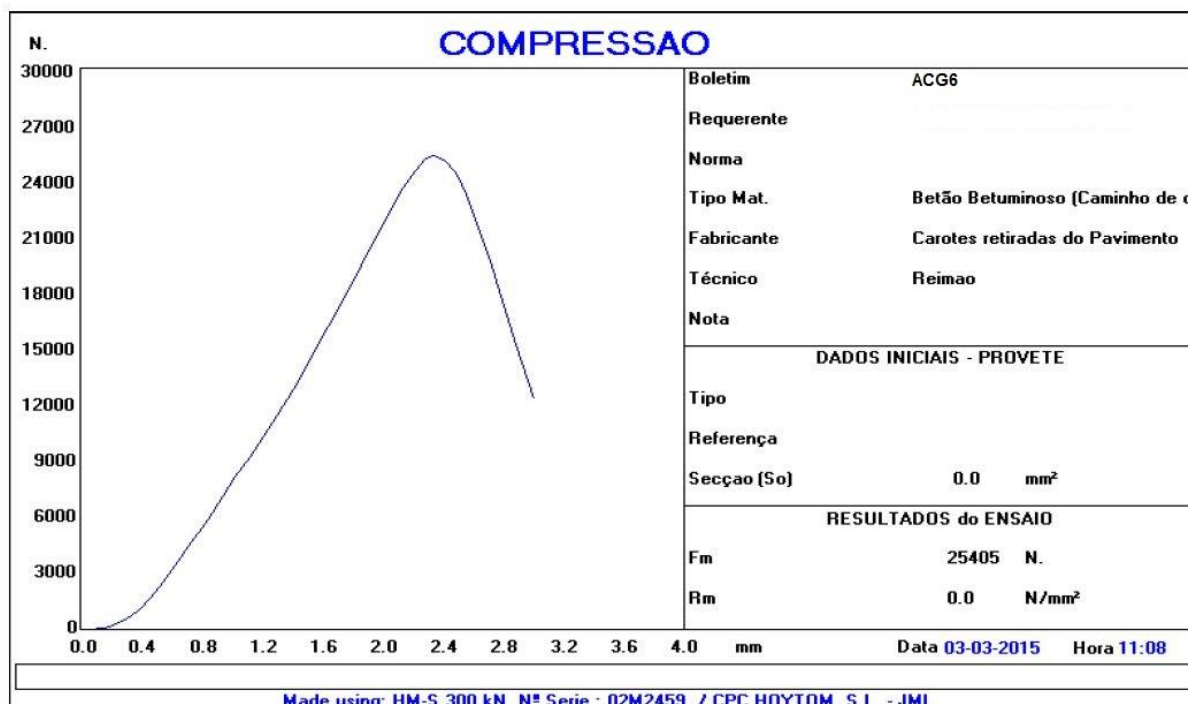
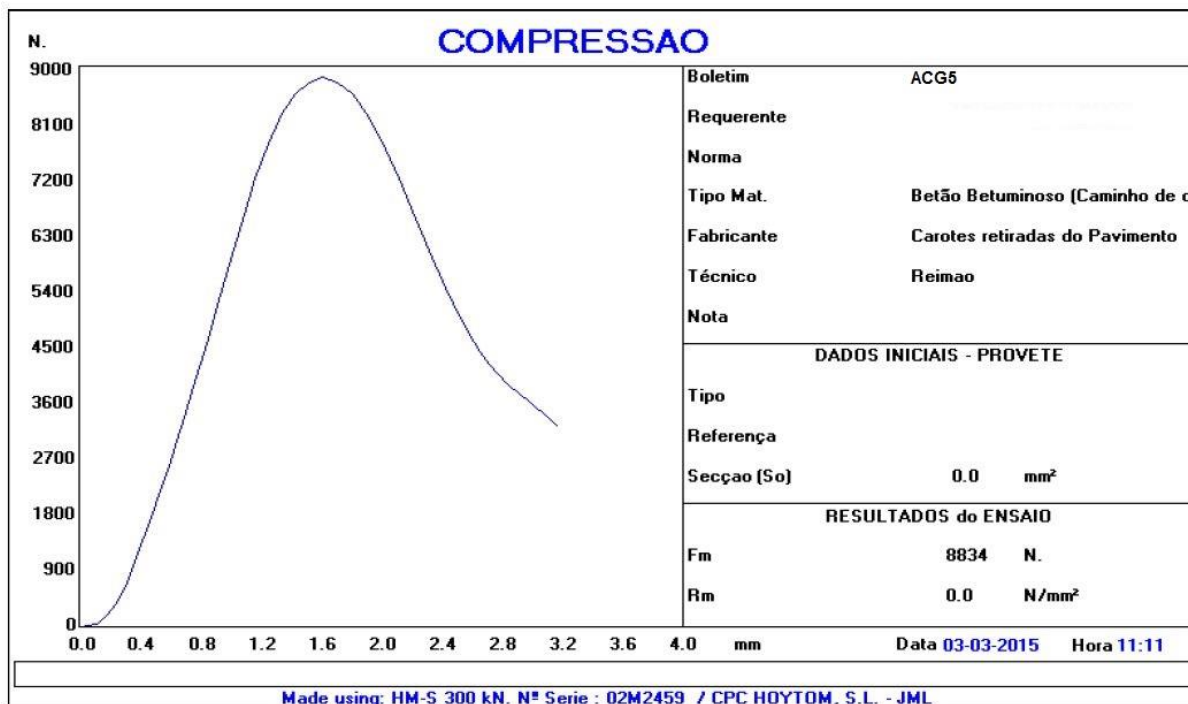
prEN 12697-48 (2014). Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – part 48: Interlayer bonding.

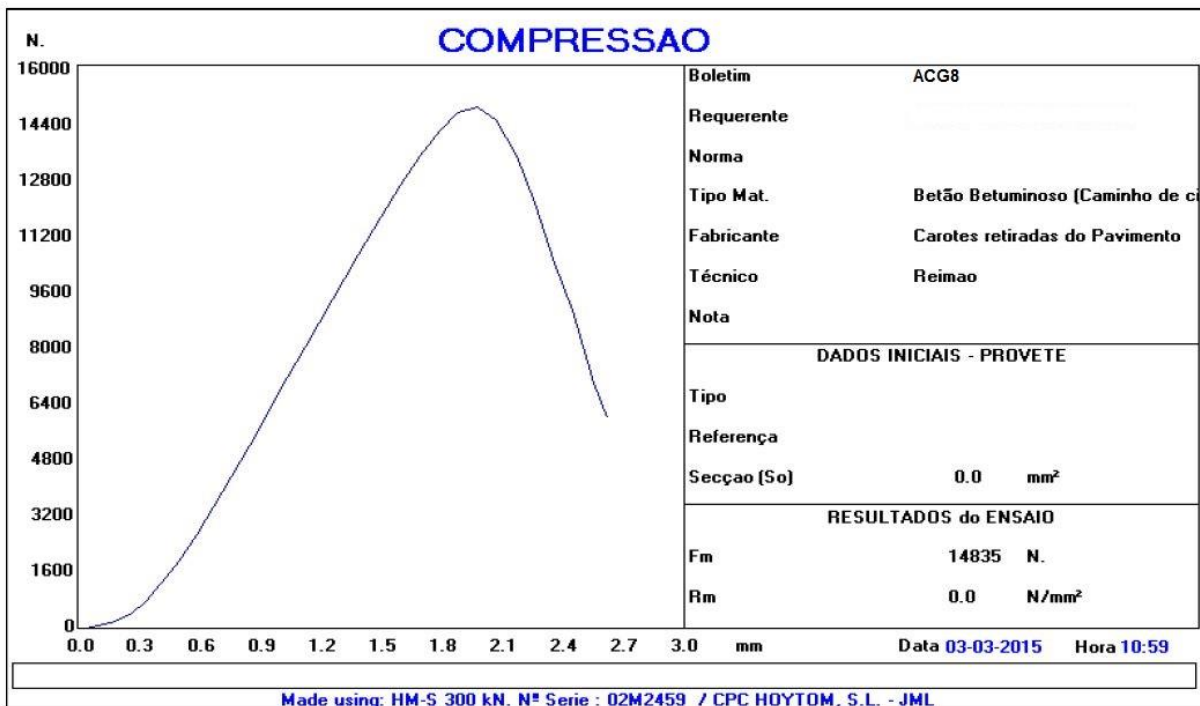
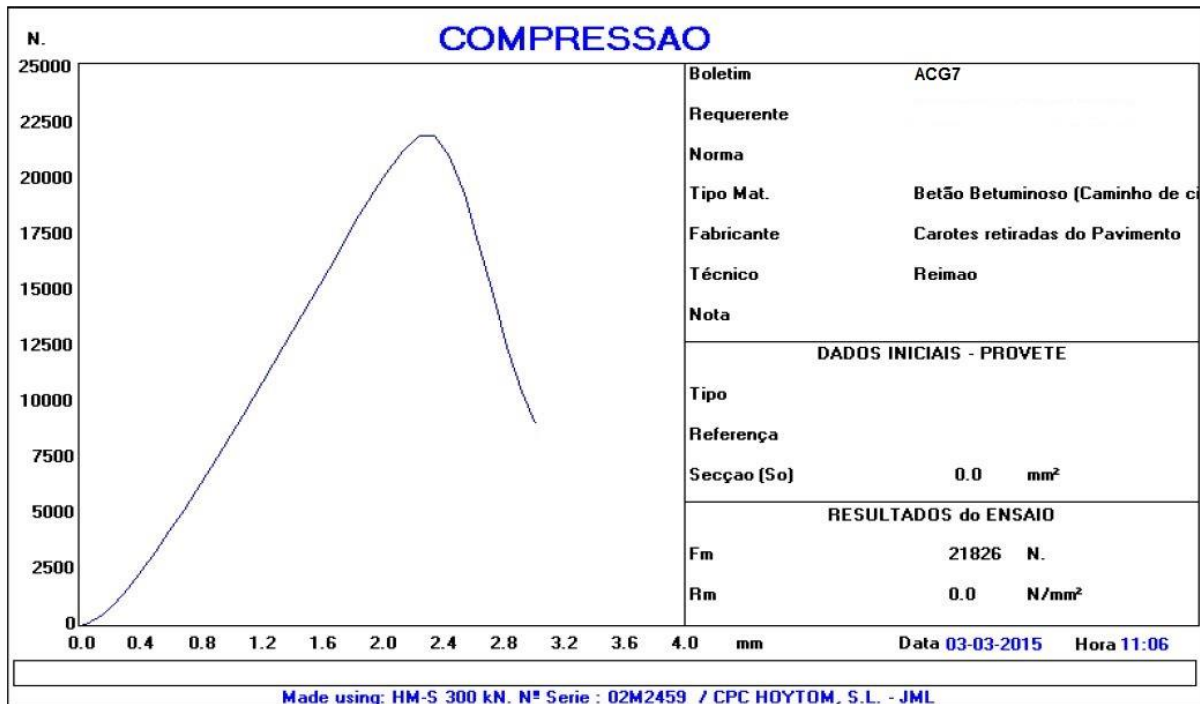
ANEXOS

Anexo A – Folhas Ensaio *Leutner* Obra A - Plena Via com Grelha Fibra de Carbono (Amostras de campo)



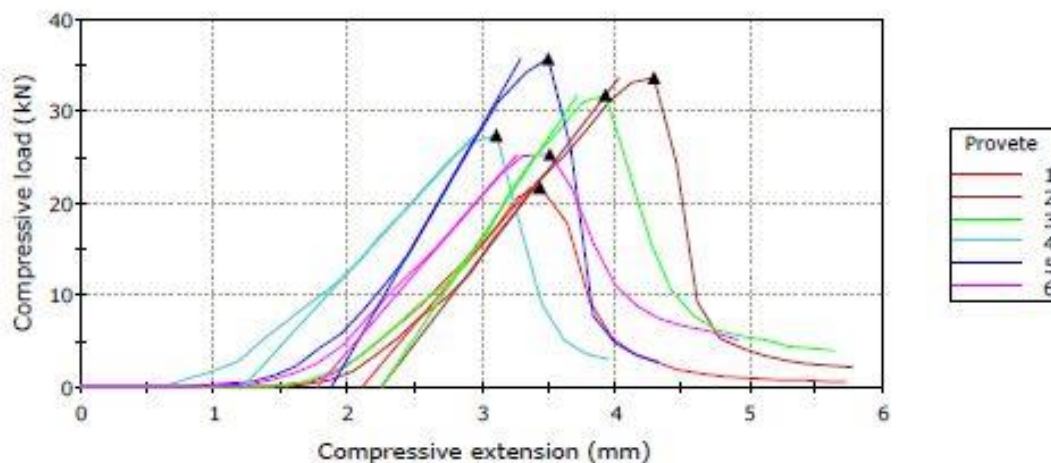






Anexo B – Folhas Ensaio *Leutner* Obra A - Plena Via com Grelha Fibra de Carbono (Amostras de laboratório)

Cilindros de Betão\Betuminoso

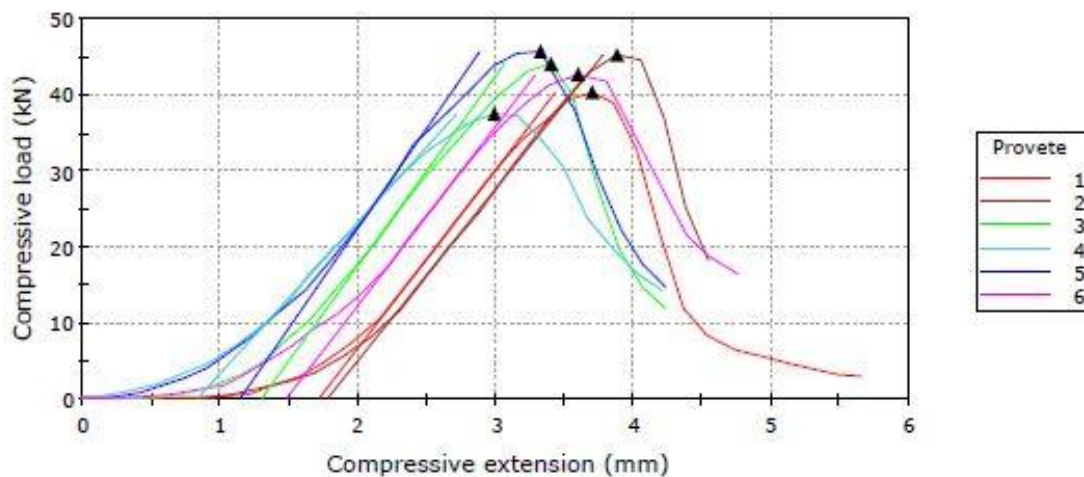


	Provete	Compressive stress at Break (Standard) (MPa)	Compressive load at Break (Standard) (N)
1	6	1,20	21758,12
2	1	1,85	33623,74
3	2	1,75	31731,14
4	3	1,50	27288,25
5	4	1,96	35637,13
6	5	1,39	25207,74
Mean		1,61	29207,69
Standard Deviation		0,3	5336,4

	Compressive extension at Break (Standard) (mm)
1	3,43
2	4,28
3	3,92
4	3,11
5	3,50
6	3,51
Mean	3,63
Standard Deviation	0,4

Anexo C – Folhas Ensaio *Leutner* Obra A - Trecho Experimental com Grelha Fibra de Carbono (Amostras de campo)

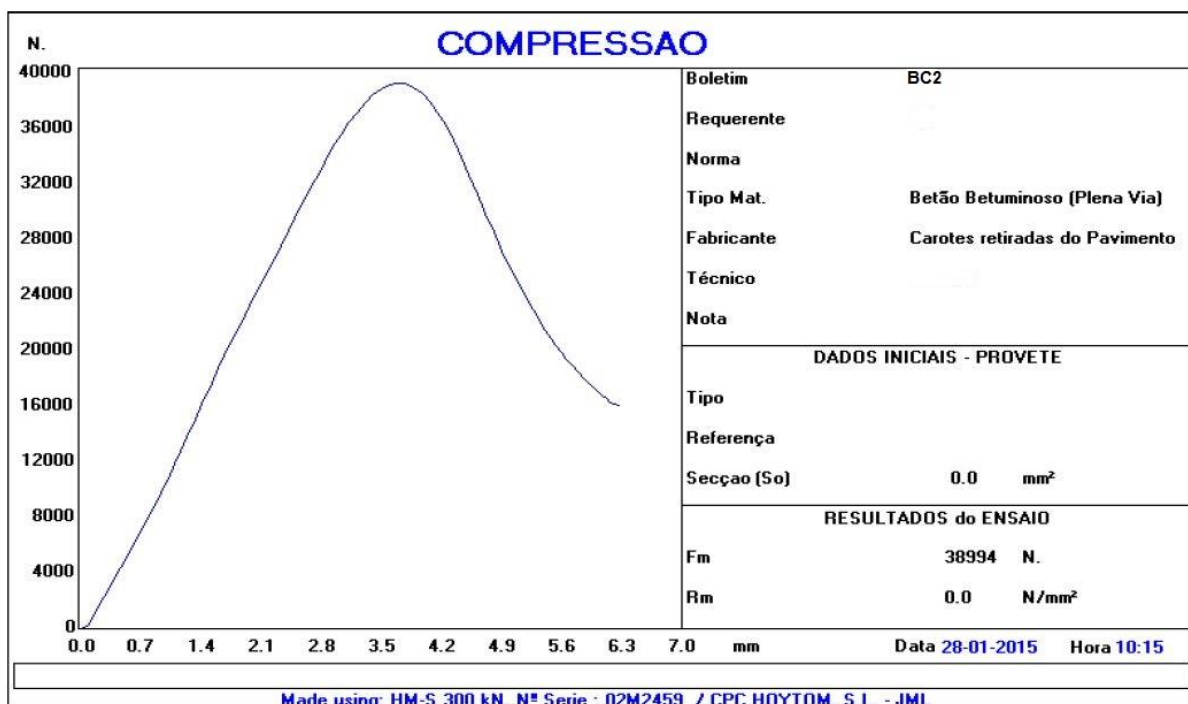
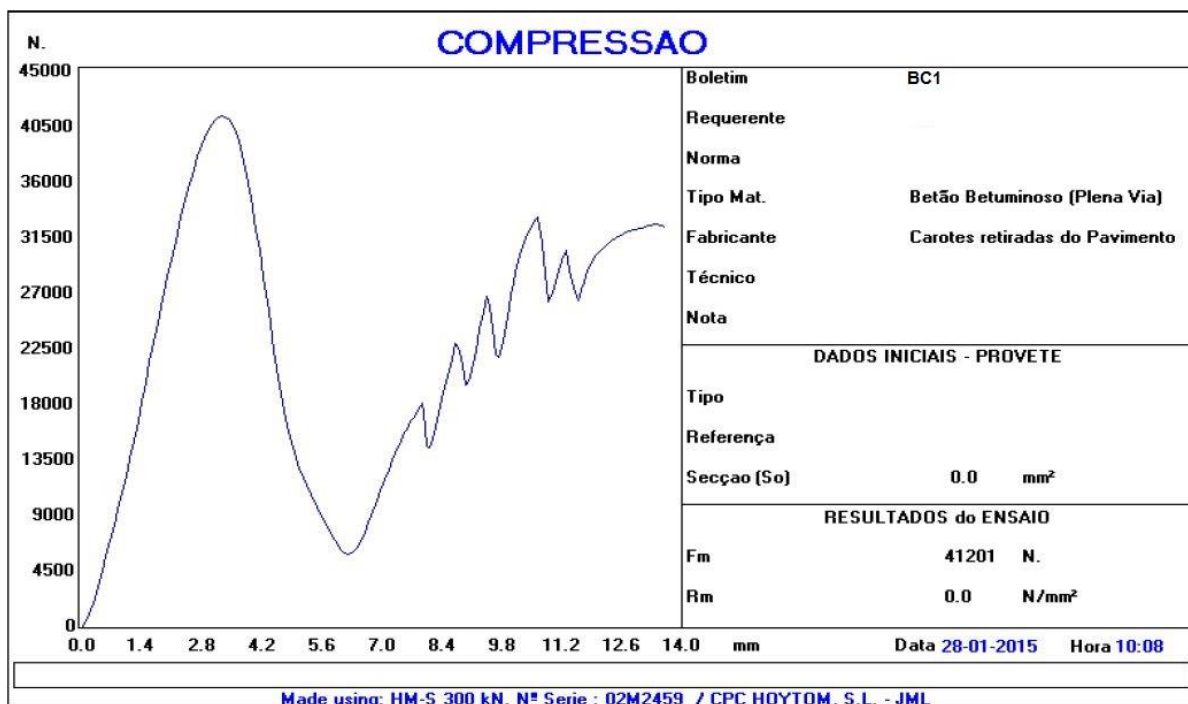
Cilindros de Betão\Betuminoso

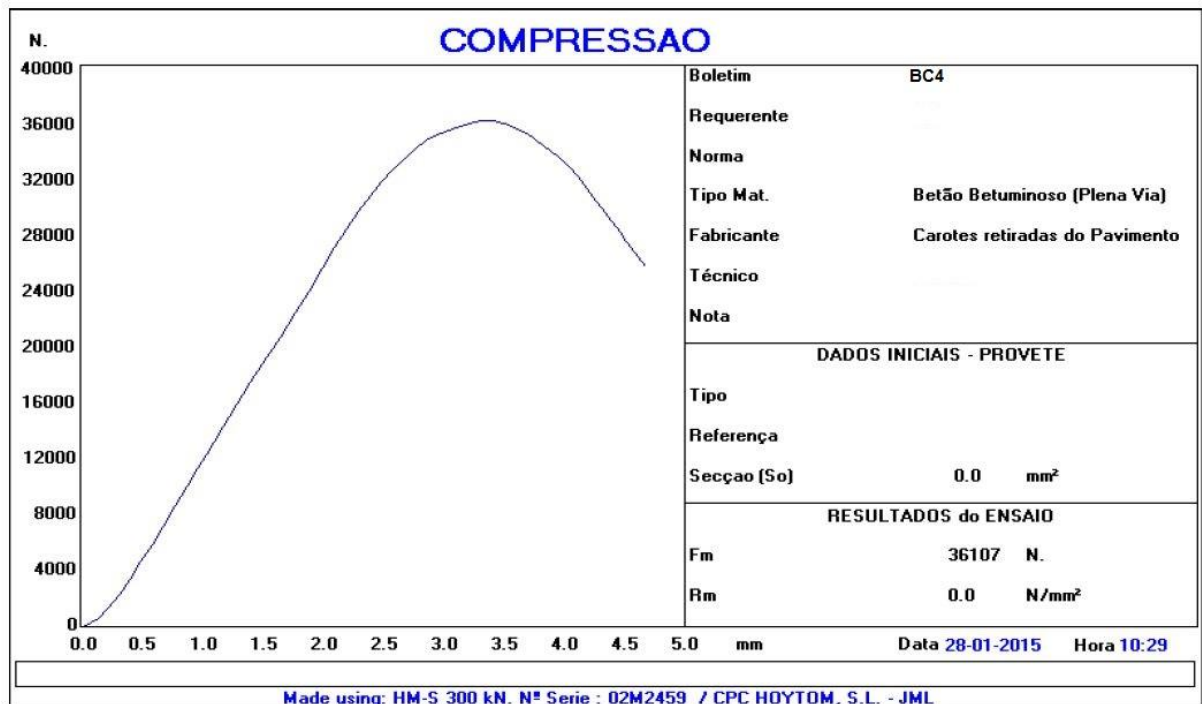
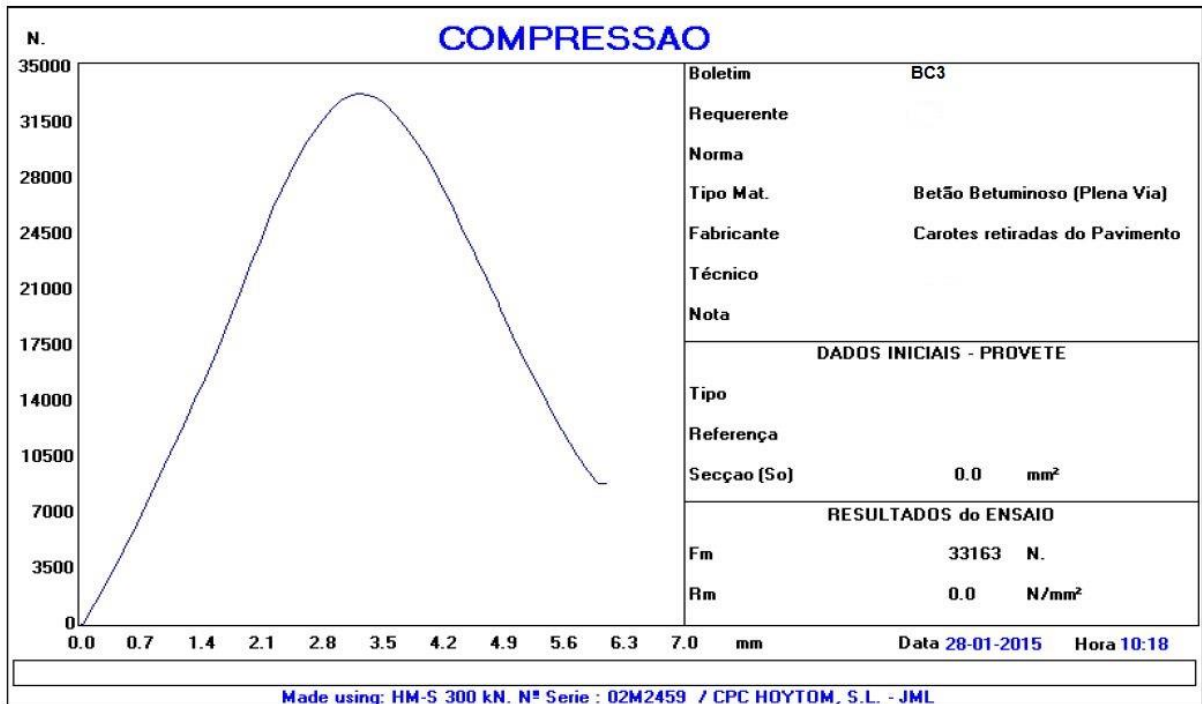


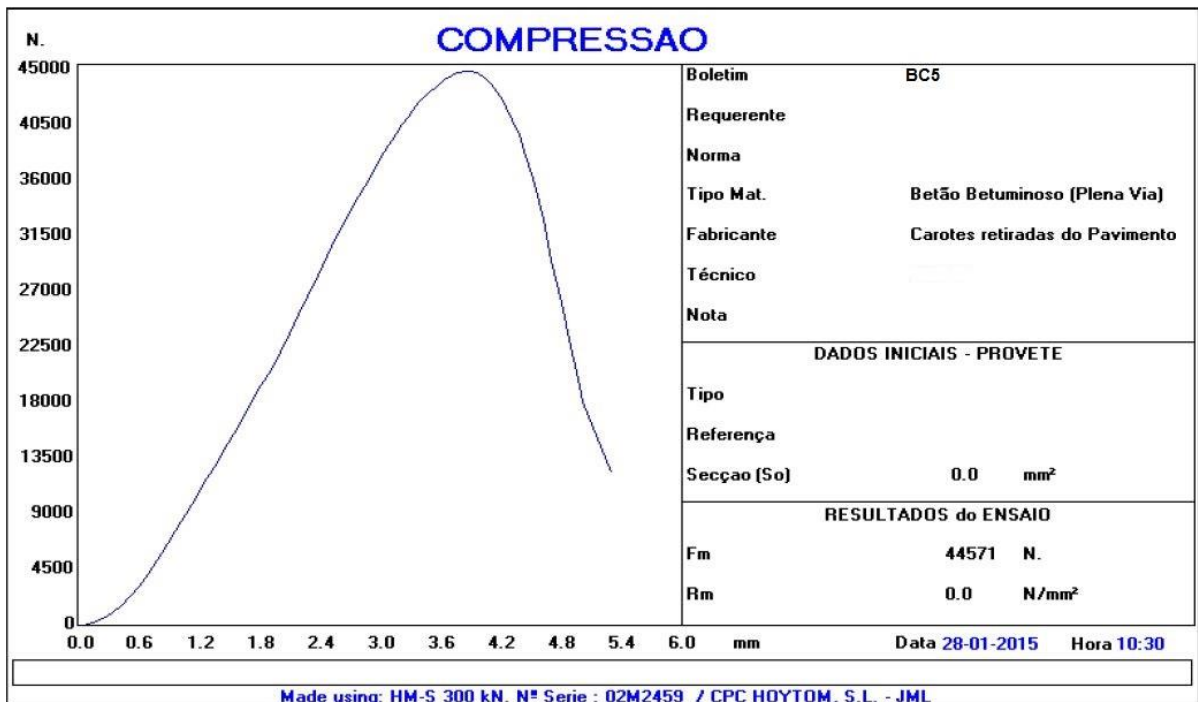
	Provete	Compressive stress at Break (Standard) (MPa)	Compressive load at Break (Standard) (kN)
1	1	2,22	40,24
2	4	2,49	45,26
3	5	2,42	43,99
4	6	2,07	37,57
5	3	2,52	45,80
6	2	2,36	42,76
Mean		2,35	42,60
Standard Deviation		0,2	3,2

	Compressive extension at Break (Standard) (mm)
1	3,70
2	3,89
3	3,40
4	3,00
5	3,32
6	3,60
Mean	3,49
Standard Deviation	0,3

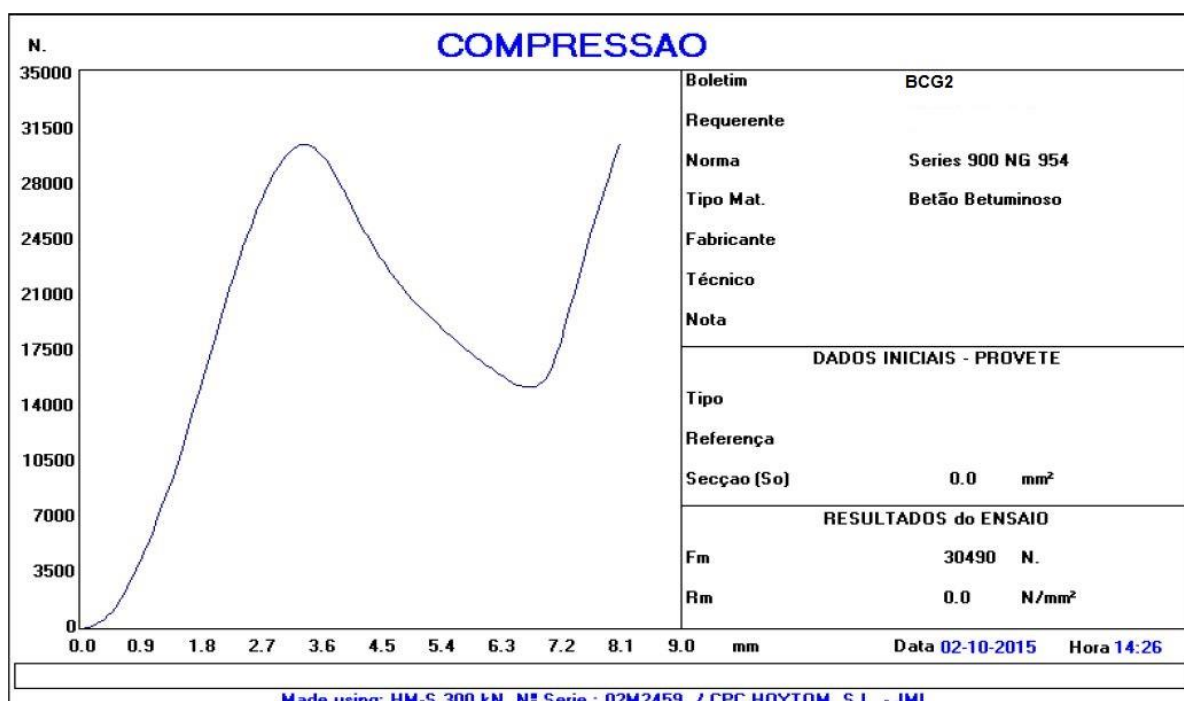
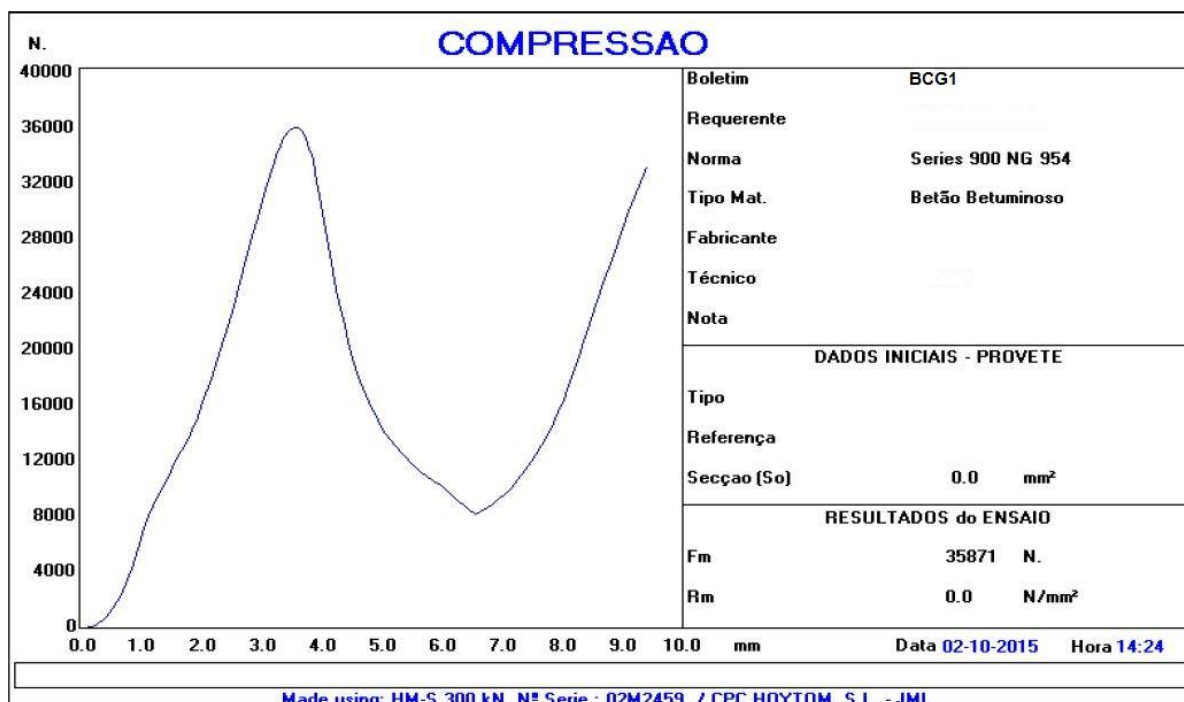
Anexo D – Folhas Ensaio *Leutner* Obra B - Plena Via sem Grelha de Reforço (Amostras de campo)

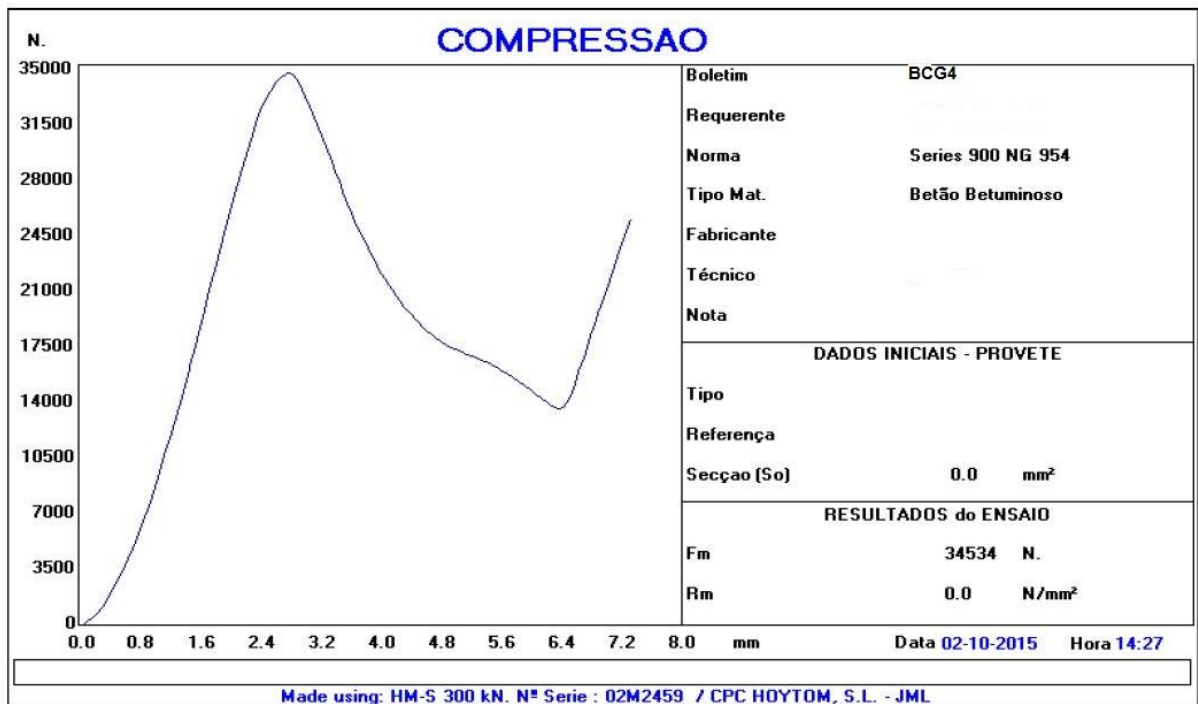
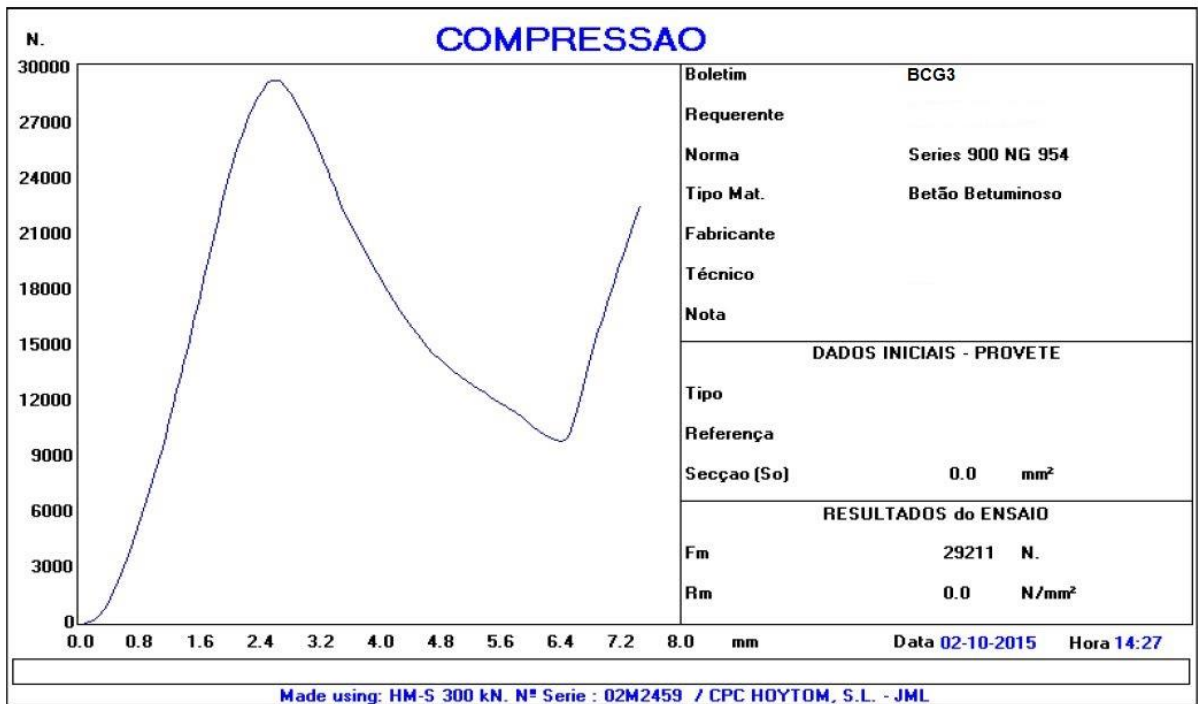


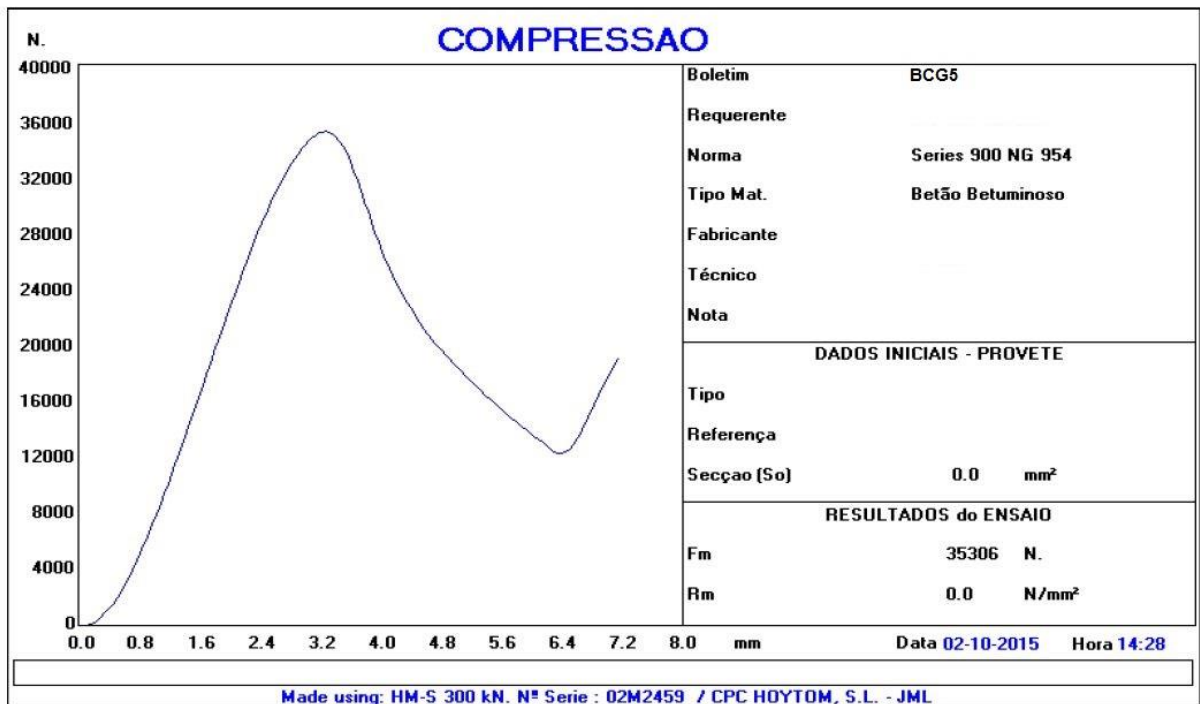




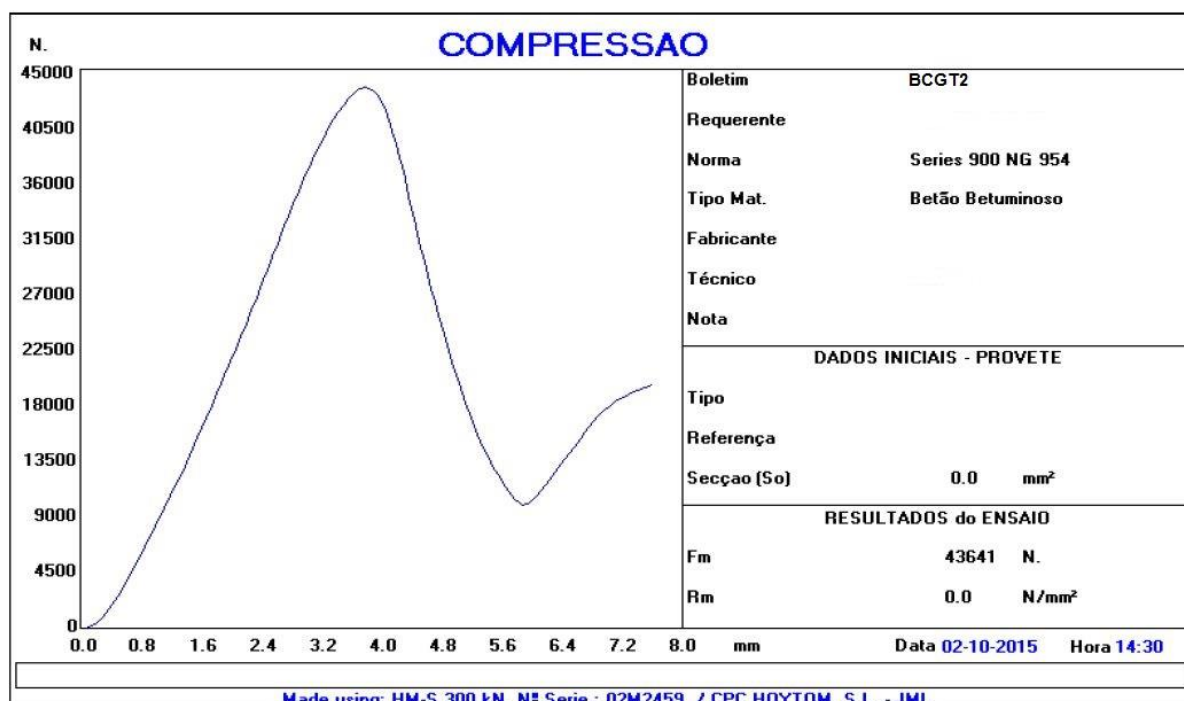
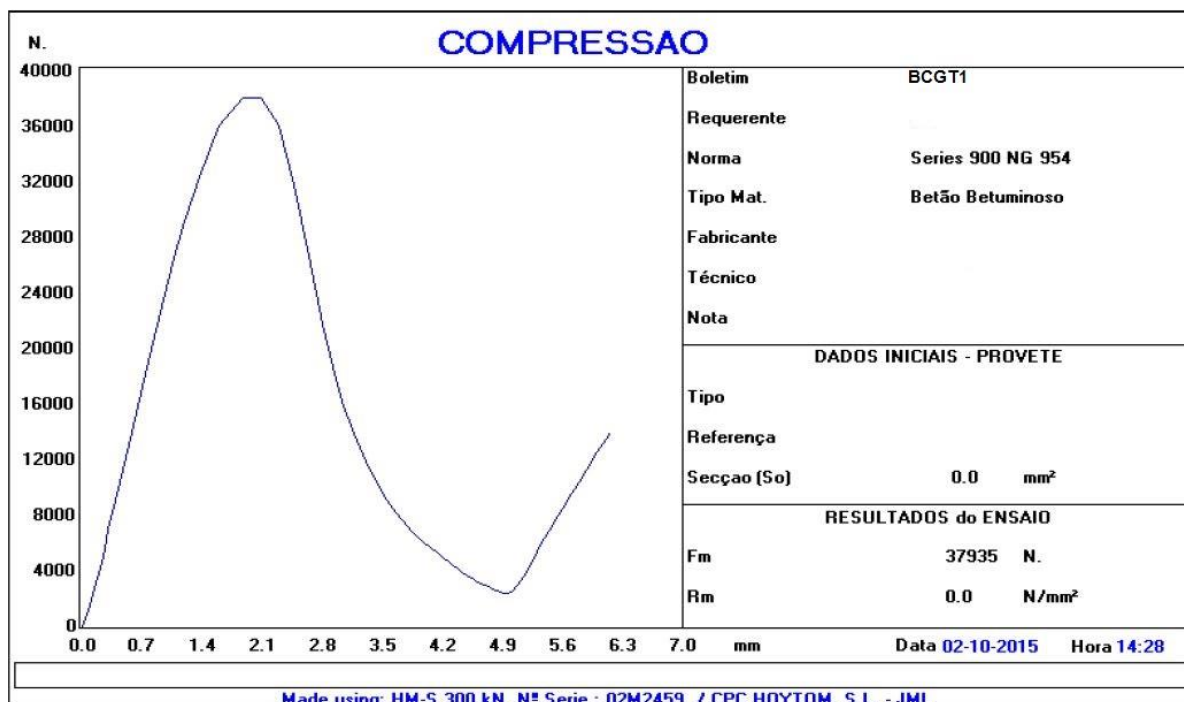
Anexo E – Folhas Ensaio *Leutner* Obra B - Plena Via com Grelha Fibra de Vidro (Amostras de campo)

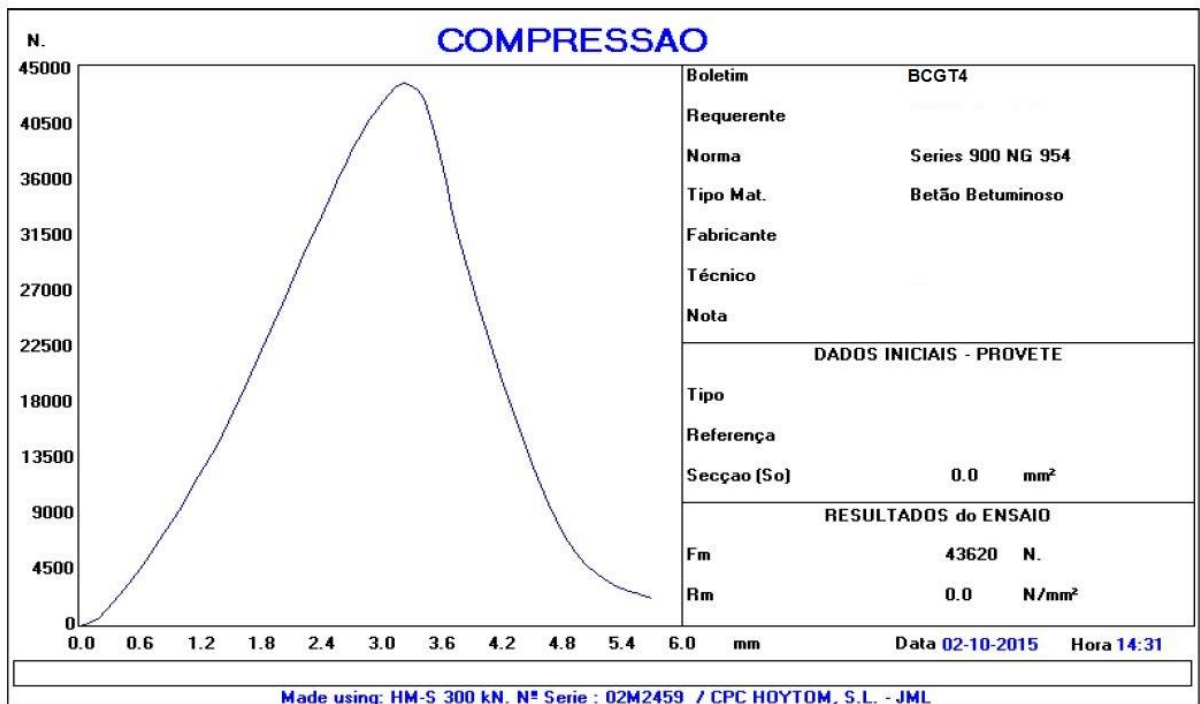
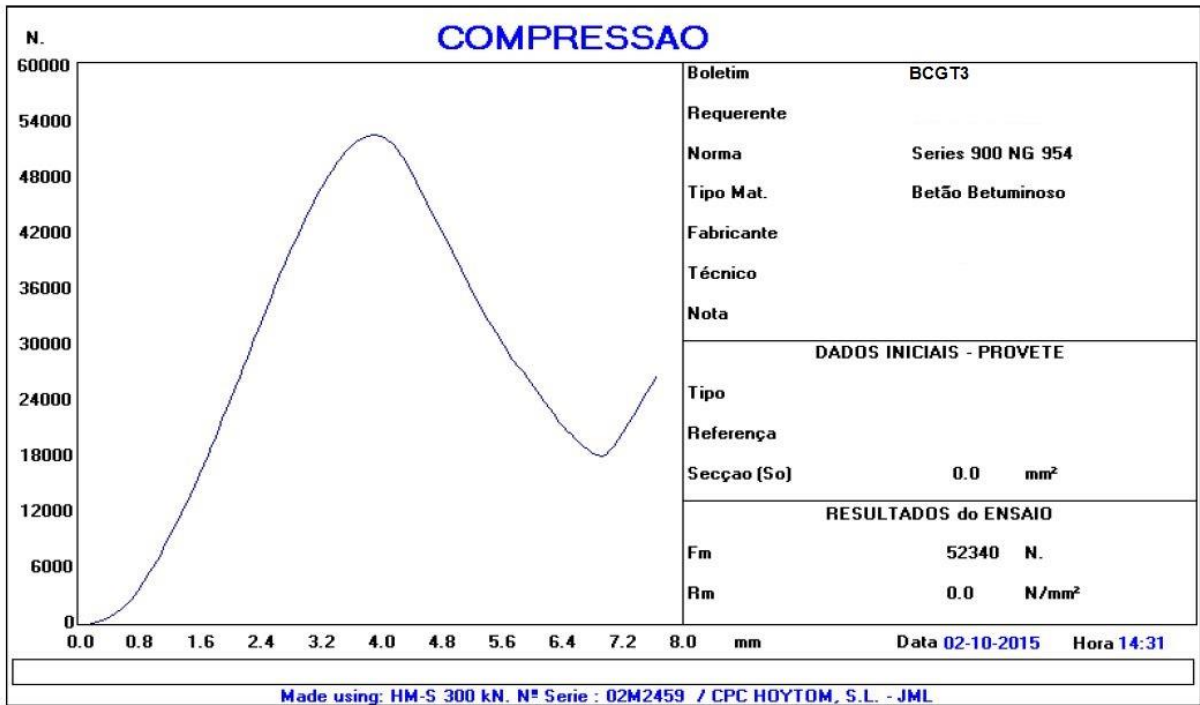






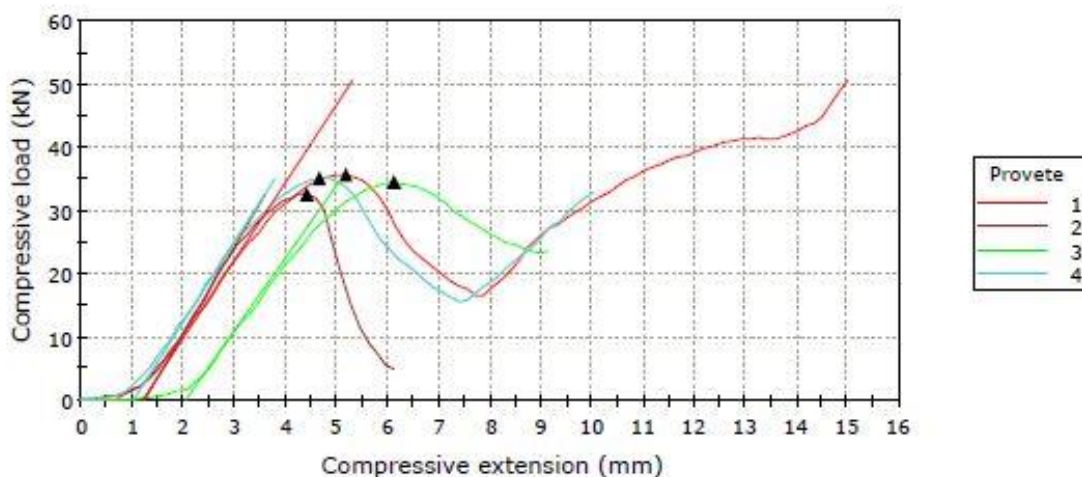
Anexo F – Folhas Ensaio *Leutner* Obra B - Trecho Experimental com Grelha Fibra de Vidro (Amostras de campo)





Anexo G – Folhas Ensaio *Leutner* Obra B - Trecho Experimental com Grelha Fibra de Vidro
Simulador de Tráfego (Amostras de campo)

Cilindros de Betão\Betuminoso

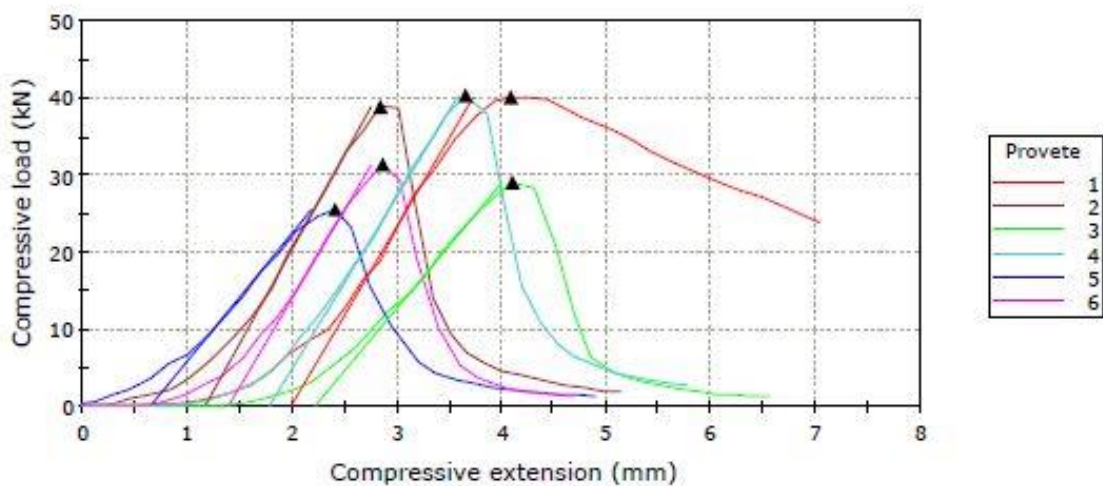


	Provete	Compressive stress at Break (Standard) (MPa)	Compressive load at Break (Standard) (N)
1	L2.2	1,97	35704,25
2	L2.1	1,80	32576,77
3	L6.1	1,90	34402,25
4	L6.2	1,93	35033,11
Mean		1,90	34429,09
Standard Deviation		0,1	1344,5

	Compressive extension at Break (Standard) (mm)
1	5,18
2	4,43
3	6,12
4	4,66
Mean	5,10
Standard Deviation	0,7

Anexo H – Folhas Ensaio *Leutner* Obra B - Trecho Experimental com Grelha Fibra de Vidro (Amostras de laboratório)

Cilindros de Betão\Betuminoso



	Provete	Compressive stress at Break (Standard) (MPa)	Compressive load at Break (Standard) (kN)
1	1	2,21	40,12
2	1	2,15	38,99
3	2	1,60	28,98
4	3	2,23	40,38
5	5	1,40	25,38
6	4	1,73	31,45
Mean		1,89	34,22
Standard Deviation		0,4	6,5

	Compressive extension at Break (Standard) (mm)	Observações
1	4,10	
2	2,85	Repetição provete 1
3	4,11	
4	3,66	
5	2,41	
6	2,87	
Mean	3,33	
Standard Deviation	0,7	