



Ana Cláudia Estêvão Melrinho

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço: Detecção por termografia de infravermelhos.

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

Orientador: Luís Manuel Cordeiro Matias, Investigador Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Co-orientadora: Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues, Professora Associada, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professora Doutora Ildi Cismaşiu
Arguente: Professor Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques
Vogal: Doutor Luís Manuel Cordeiro Matias

**Anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço:
Detecção por termografia de infravermelhos.**

“Copyright” Ana Cláudia Estêvão Melrinho, 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 objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

O texto da presente Dissertação não está escrito ao abrigo do novo acordo ortográfico da Língua Portuguesa.

*Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive.*

(Ricardo Reis, 14.02.1933)

Aos meus pais, Antónia e José Carlos.

Agradecimentos

A elaboração da presente dissertação foi possível graças ao apoio e colaboração de diversas pessoas e entidades, às quais não poderia deixar de agradecer.

Ao Doutor Luís Matias, do LNEC, e à Professora Doutora Paulina Faria, da FCT/UNL, pela orientação e co-orientação na realização deste trabalho, respectivamente, pelo apoio prestado e por todos os meios disponibilizados.

Ao Sr. Engenheiro José da Fonseca e ao Sr. Ramiro Flores pela simpatia com que me acolheram desde o início e pela disponibilidade prestada na elaboração dos provetes, utilizados no presente trabalho.

Ao Doutor António Santos e ao Bolseiro Jorge Amaral pela paciência e por todo o apoio prestado durante a realização dos ensaios no NAICI (Núcleo da Acústica, Iluminação, Componentes e Instalações) do LNEC.

À Engenheira Helena Silva e à Bolseira Joana Pereira por ajudarem a ultrapassar as dificuldades com os equipamentos durante os ensaios no NMO (Núcleo de Materiais Orgânicos) do LNEC, e por toda a bibliografia disponibilizada.

À Doutora María del Mar Barbero-Barrera e à Universidad Politécnica de Madrid pela ajuda incansável e pela disponibilização do equipamento emissómetro modelo AE.

A toda a equipa do Departamento de Edifícios, em geral, por me terem acolhido e apoiado durante a estadia no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Por fim, mas não menos importante, aos meus pais, José e Antónia, e à minha irmã Carla pela compreensão, tolerância e apoio durante todo o percurso académico.

Resumo

Uma cobertura constitui a parte superior da envolvente exterior de um edifício, garantindo estanquidade e protecção face à actuação de agentes atmosféricos como a água da chuva, o vento e a radiação solar.

Apesar das coberturas planas serem uma solução com uso crescente em Portugal e de terem sofrido evoluções positivas ao longo do tempo, a nível de materiais e de soluções construtivas, continuam a surgir vários tipos de anomalias que não permitem um comportamento adequado destas soluções. Para detectar precocemente estes problemas, é de extrema importância a melhoria do ensaio não destrutivo através de termografia de infravermelhos, avaliado e desenvolvido no âmbito deste trabalho.

Este método de ensaio permite, através da medição da radiação emitida pela superfície da cobertura e consequente representação da distribuição das suas temperaturas superficiais, identificar heterogeneidades de temperatura que podem resultar da presença de espaços de ar e/ou de água sob o revestimento de impermeabilização.

Face às dificuldades encontradas na aplicação do método *in situ*, numa primeira fase utilizou-se a termografia de infravermelhos em laboratório. Para o efeito foram realizados ensaios em dois provetes distintos: um com anomalias controladas e outro sem qualquer tipo de anomalias. Assim, em condições controladas e comparando os provetes entre si, pretende-se comprovar que é possível detectar a existência de espaços de ar e água sob o revestimento de impermeabilização.

Numa segunda fase, o método termográfico foi utilizado em provetes no exterior, com anomalias controladas, e em coberturas *in situ* de forma a validar o estudo realizado em laboratório.

Como estudo complementar, foram realizados ensaios em laboratório para caracterizar as propriedades radiativas das membranas de impermeabilização. Esta análise torna-se muito importante por ser necessária a introdução de vários parâmetros, como é o caso da emitância, na câmara de termografia.

Palavras chave:

Cobertura em terraço; anomalia em impermeabilização; termografia de infravermelhos; radiação; reflectância; emitância.

Abstract

A flat roof constitutes the upper part of the involving exterior of a building, ensuring watertightness and protection against the actions of the atmospheric agents such as rain water, wind and solar radiation.

Despite the flat roofs being an increasing solution in Portugal and although they went through positive evolutions throughout time when it comes to the level of materials and design solutions, various types of anomalies that do not allow an adequate behavior of these solutions still emerges. For early detection of these problems it is extremely important to improve the non-destructive testing using infrared thermography, assessed and developed in this paper.

By measuring the radiation emitted by the flat roof surface and the resulting representation of superficial temperatures distribution, this test method allows to identify the heterogeneity of the temperatures that can result from the presence of air spaces or from water under the waterproofing coating.

Given the difficulties found in the application of the *in situ* method, the infrared thermography was initially used in a laboratory. For this purpose, the test were performed on two different samples: one with controlled anomalies and other without any kind of anomalies. Comparing both samples in controlled conditions intends to prove if it is possible to detect the existence of air spaces and/or water under the waterproofing coating.

On a second fase, the thermographic method was used on samples on natural exterior exposure, with controlled anomalies and in *in situ* flat roofs in order to validate the results obtained in the laboratory.

As a complementary study, laboratory tests were performed to identify the radiative properties of the waterproofing membranes. This analysis is very important because of the necessary introduction of multiple parameters, as is the case of emittance, in the thermography cameras.

Keywords:

Flat roof; anomalie in waterproofing; infrared thermography; radiation; reflectance; emittance.

Índice de Texto

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objectivos e metodologia	1
1.3	Organização e estrutura do trabalho	2
2	Sistemas de revestimento de coberturas em terraço	5
2.1	Exigências funcionais	5
2.1.1	Generalidades	5
2.1.2	Exigências funcionais da cobertura	5
2.1.3	Exigências funcionais do revestimento de impermeabilização	7
2.2	Coberturas em terraço: camadas e respectivas funções	10
2.2.1	Generalidades	10
2.2.2	Principais camadas	11
2.3	Classificação das coberturas em terraço	13
2.3.1	Generalidades	13
2.3.2	Classificação quanto à acessibilidade	13
2.3.3	Classificação quanto ao tipo de camada de protecção do sistema de impermeabilização	18
2.3.4	Classificação quanto às soluções de impermeabilização	18
2.3.5	Classificação quanto à posição da camada de isolamento térmico	19
2.3.6	Classificação quanto à pendente	20
2.3.7	Classificação quanto à estrutura resistente	21
2.4	Sistemas de impermeabilização não-tradicionais com produtos prefabricados	22
2.4.1	Generalidades	22
2.4.2	Membranas de betume polímero	22
2.4.3	Membranas de PVC plastificado	24
2.4.4	Membranas de poliolefinas (TPO ou FPO)	25
2.4.5	Membranas de EPDM	26
2.4.6	Membranas de borracha butílica	28
2.4.7	Membranas de poli-isobutileno (PIB)	28
2.4.8	Membranas de polietileno clorado (CPE)	29
3	Anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço	31
3.1	Generalidades	31
3.2	Anomalias em superfície corrente da cobertura	31
3.2.1	Fissuração do revestimento de impermeabilização	31

3.2.2	Perfuração do revestimento de impermeabilização	33
3.2.3	Arrastamento da protecção pesada com elementos soltos	33
3.2.4	Arrancamento do revestimento de impermeabilização	34
3.2.5	Permanência prolongada da água na cobertura	34
3.2.6	Formação de pregas	35
3.2.7	Descolamento das juntas de sobreposição	36
3.2.8	Desenvolvimento de vegetação	37
3.2.9	Empolamentos	37
3.3	Anomalias em pontos singulares da cobertura	38
3.3.1	Anomalias em remates com elementos emergentes	38
3.3.2	Anomalias em juntas de dilatação	41
3.3.3	Anomalias em zonas de escoamento de águas pluviais	42
4	Termografia de infravermelhos	45
4.1	História da termografia de infravermelhos	45
4.2	Teoria da radiação: princípios físicos	46
4.2.1	Noções de transmissão de calor	46
4.2.2	Conceitos básicos	47
4.2.3	Espectro electromagnético	48
4.2.4	Radiação do corpo negro	50
4.2.5	Radiação do corpo não-negro	52
4.2.6	Propriedades radiativas de uma superfície	52
4.3	Termografia de infravermelhos: um ensaio não destrutivo	56
4.3.1	Generalidades	56
4.3.2	Método passivo	56
4.3.3	Método activo	56
4.3.4	Vantagens e limitações da termografia de infravermelhos	59
4.3.5	Factores que influenciam a medição da radiação emitida	59
4.3.6	Equipamentos de medição	62
4.4	Propriedades térmicas de materiais	63
5	Detecção de anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço	65
5.1	Metodologia de estudo	65
5.2	Caracterização das propriedades radiativas do revestimento de impermeabilização	66
5.2.1	Generalidades	66
5.2.2	Membranas de impermeabilização estudadas	66
5.2.3	Ensaio realizados	68
5.3	Detecção de anomalias por termografia de infravermelhos	76
5.3.1	Generalidades	76
5.3.2	Ensaio em laboratório	78
5.3.3	Ensaio <i>in situ</i> com anomalias controladas	81
5.3.4	Avaliação de coberturas <i>in situ</i> em condições reais	82
6	Apresentação e análise de resultados	87
6.1	Caracterização das propriedades radiativas do revestimento de impermeabilização	87
6.1.1	Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)	87

6.1.2	Reflectância total	93
6.1.3	Emitância	101
6.2	Detecção de anomalias por termografia de infravermelhos	101
6.2.1	Ensaio em laboratório	101
6.2.2	Ensaio <i>in situ</i> com anomalias controladas	113
6.2.3	Avaliação de coberturas <i>in situ</i> em condições reais	123
7	Conclusões	131
7.1	Considerações finais	131
7.2	Sugestões para desenvolvimentos futuros	134
	Bibliografia	135
A	Características técnicas dos equipamentos utilizados	
A.1	ThermaCAM P640	A-1
A.2	Luminómetro CS-100	A-3
A.3	Esfera integradora LMT RT 500	A-5
A.4	Espectrofotómetro HITACHI modelo U-3300	A-6
A.5	Emissómetro modelo AE	A-8
B	Resultados obtidos nos ensaios realizados	B-1
B.1	Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)	B-1
B.2	Reflectância total - Esfera integradora LMT RT 500 (visível)	B-36
B.3	Reflectância total - Espectrofotómetro HITACHI modelo U-3300 (UV/ visível/ NIR)	B-42
B.4	Detecção de anomalias por termografia de infravermelhos - ensaios em laboratório	B-50
B.4.1	Detecção de empolamentos	B-50
B.4.2	Detecção de água	B-55
B.4.3	Alteração do ângulo de observação	B-58
B.5	Detecção de anomalias por termografia de infravermelhos - ensaios <i>in situ</i> com anomalias controladas	B-61
B.5.1	Mapeamento das anomalias	B-61
B.5.2	Detecção de empolamentos	B-62
B.5.3	Detecção de água	B-65

Índice de Figuras

2.1	Relação entre as principais camadas de uma cobertura em terraço e as exigências funcionais a verificar.	6
2.2	Cobertura de acesso limitado com aplicação do isolante térmico acima do revestimento de impermeabilização, cobertura do tipo invertida.	14
2.3	Cobertura acessível a pessoas com aplicação do isolante térmico acima do revestimento de impermeabilização, cobertura do tipo invertida.	14
2.4	Cobertura acessível a veículos com aplicação do isolante térmico acima do revestimento de impermeabilização, cobertura do tipo invertida.	15
2.5	Cobertura ajardinada com aplicação do isolante térmico acima do revestimento de impermeabilização, cobertura do tipo invertida.	16
2.6	Exemplos de estruturas resistentes rígidas.	21
2.7	Exemplo de uma estrutura resistente flexível.	22
3.1	Inexistência de camada de dessolidarização entre a betonilha e o revestimento de impermeabilização.	32
3.2	Dessolidarização do granulado mineral em algumas zonas de membrana betuminosa. . .	32
3.3	Perfuração do revestimento de impermeabilização por punçoamento estático.	33
3.4	Efeito da acção do vento num revestimento de impermeabilização com fixação mecânica. . .	34
3.5	Acumulação de água na cobertura devido à deficiente conformação da camada de forma. . .	35
3.6	Formação de pregas no revestimento de impermeabilização.	35
3.7	Descolamento da junta de sobreposição num revestimento de impermeabilização	36
3.8	Descolamento das juntas de sobreposição devido às forças de pelagem originadas pelo vento.	36
3.9	Desenvolvimento de vegetação na junta de sobreposição da membrana.	37
3.10	Exemplos de remates com elementos emergentes.	38
3.11	Correcta execução de um remate com elemento emergente utilizando rufo metálico - sistema de camada dupla em zona corrente.	39
3.12	Correcta execução de um remate com elemento emergente através da introdução desse remate na alvenaria. Inserção do remate na espessura da parede sem estar proporcional à espessura da parede - sistema de camada dupla em zona corrente.	39
3.13	Correcta execução de um remate sob soleira de uma porta	40
3.14	Disposições construtivas a considerar quando é aplicada uma camada de protecção rígida num remate com elemento emergente.	41
3.15	Correcta execução de um remate em zona de junta de dilatação ao nível da superfície corrente da cobertura.	42
3.16	Correcta execução de um remate sobrelevado em zona de junta de dilatação.	42

3.17	Infiltrações de água junto a embocaduras dos tubos de queda	42
3.18	Plano de manutenção de uma cobertura.	43
3.19	Correcta execução de um remate com embocadura de um tubo de queda.	43
3.20	Sentido a adoptar para a plicação da membrana em zona de caleira.	44
3.21	Correcta execução de um remate em zona de caleira.	44
4.1	Exemplo de uma câmara de termografia actualmente comercializada.	46
4.2	Espectro electromagnético.	48
4.3	Caracterização das cores da radiação visível em termos de comprimentos de onda.	49
4.4	Distribuições espectrais de referência correspondentes à irradiância espectral.	50
4.5	Poder emissivo espectral de um corpo negro segundo a Lei de Planck.	51
4.6	Radiação absorvida, reflectida e transmitida num corpo semitransparente.	53
4.7	Variação da emitância de alguns não metais com o ângulo de observação.	60
4.8	Esquema representativo da sobreposição de efeitos que influencia a radiação emitida por uma superfície parcialmente transparente.	61
4.9	Câmara termográfica utilizada ao longo do estudo.	62
5.1	Aplicação das tintas reflectantes nas amostras de betume polímero.	67
5.2	Luminómetro CS-100 da Minolta.	68
5.3	Determinação da luminância utilizando o luminómetro e um goniómetro electrónico.	69
5.4	Esquema da disposição do luminómetro, da fonte luminosa e da amostra para os ângulos (0°/30°).	70
5.5	Esfera integradora LMT RT 500 do NAICI, LNEC.	71
5.6	Esquema a adoptar na determinação da reflectância total através da esfera integradora LMT RT 500.	71
5.7	Padrão branco utilizado na calibração da consolda de medição.	72
5.8	Consola de medição calibrada com o valor da reflectância do padrão branco.	72
5.9	Espectrofotómetro HITACHI modelo U-3300 do NMO, LNEC.	73
5.10	Introdução da placa difusora branca na esfera integradora do espectrofotómetro.	73
5.11	Colocação das amostras padrão na esfera integradora para calibração do espectrofotómetro.	74
5.12	Obtenção de um espectro de reflectância através do espectrofotómetro HITACHI modelo U-3300.	74
5.13	Emissómetro modelo AE.	75
5.14	Termo-higrómetro HygroLog digital.	76
5.15	Placa de aquecimento utilizada nos ensaios em laboratório.	77
5.16	Análise da evolução da temperatura da placa de aquecimento através da termografia de infravermelhos.	77
5.17	Suporte metálico utilizado para garantir a perpendicularidade entre a câmara termográfica e a superfície a inspeccionar.	78
5.18	Limpeza da superfície das lajetas com jacto de ar antes da aplicação das membranas de impermeabilização.	78
5.19	Aplicação das membranas de betume polímero sobre as lajetas.	79
5.20	Seringa utilizada para a injeção de água entre a membrana de impermeabilização e o suporte.	79
5.21	Aquecimentos dos provetes por radiação.	80
5.22	Procedimento para o posicionamento da câmara termográfica a 60° com a normal à superfície do provete.	81

5.23	Constituição dos provetes com anomalias controladas para ensaios no exterior.	81
5.24	Definição da grelha de medição para os provetes a ensaiar no exterior.	82
5.25	Localização da célula C5.	83
5.26	Definição da grelha de medição para a cobertura da célula C5.	83
5.27	Colocação da fita de alumínio adesiva para delimitação dos rectângulos da grelha.	84
5.28	Localização do edifício de habitação plurifamiliar utilizado como caso de estudo.	84
6.1	Reflectância direcciona obtida para a amostra XC perpendicular à fonte luminosa e perpendicular à leitura.	87
6.2	Reflectância direcciona obtida para a amostra XC/BR perpendicular à fonte luminosa e perpendicular à leitura.	88
6.3	Esquema representativo da reflectância direcciona das amostras XC e XB/BR em função do ângulo de incidência.	89
6.4	Variação da reflectância direcciona da amostra de membrana de betume polímero com filme de polietileno na face superior e inferior.	89
6.5	Simulação do comportamento da amostra ASF com a variação do ângulo de leitura.	90
6.6	Diferenças entre a variação da reflectância direcciona da amostra XB simples e com tinta reflectante de cor branca ou cor telha.	90
6.7	Influência da cor do granulado mineral utilizado como protecção leve na reflectância direcciona da amostra.	91
6.8	Influência da aplicação de primário na reflectância direcciona da amostra de XC/BR.	92
6.9	Influência da aplicação de primário na reflectância direcciona das amostras de XC/TLH.	92
6.10	Influência da cor da tinta reflectante aplicada na reflectância total das amostras.	93
6.11	Variação da reflectância total ao aplicar a tinta reflectante de cor telha sobre vários tipos de suportes.	94
6.12	Variação da reflectância total ao aplicar a tinta reflectante de cor branca sobre vários tipos de suportes.	94
6.13	Variação da reflectância total com a cor do granulado mineral das membranas de betume polímero.	95
6.14	Reflectância total de cada amostra antes e depois da aplicação de tinta reflectante de cor telha.	95
6.15	Influência da aplicação de primário na reflectância total das amostras XC/BR e de XC/TLH.	96
6.16	Variação da reflectância total das amostras de XC, XC/BR e XC/TLH com o comprimento de onda.	96
6.17	Influência da cor inicial do suporte na reflectância total da amostra ao aplicar tinta reflectante de cor telha.	97
6.18	Influência da cor inicial do suporte na reflectância total da amostra ao aplicar tinta reflectante de cor branca.	97
6.19	Variação da reflectância total da amostra com o comprimento de onda de acordo com a cor do granulado mineral da membrana de betume polímero.	98
6.20	Reflectância total de cada amostra com ou sem aplicação de tinta de cor telha.	99
6.21	Influência da aplicação de primário na reflectância total da amostra XC/BR.	99
6.22	Influência da aplicação de primário na reflectância total da amostra XC/TLH.	100
6.23	Comparação dos valores de reflectância total obtidos no ensaio da esfera integradora LMT RT 500 com os obtidos no ensaio do espectrofotómetro HITACHI.	100
6.24	Mapeamento das anomalias existentes no provete utilizado nos ensaios em laboratório.	101

6.25	Termograma obtido logo após a retirada da placa de aquecimento (0 minutos), aquecimento por condução.	102
6.26	Termograma obtido após um período de arrefecimento de 6 minutos, aquecimento por condução.	103
6.27	Termograma com a delimitação das zonas dos empolamentos existentes, Li1 e Li2, e representação da isotérmica superior.	103
6.28	Diferencial de temperaturas entre a zona aderente e a zona de empolamentos ao longo do período de arrefecimento (aquecimento por condução).	104
6.29	Termograma obtido após um período de arrefecimento de 8 minutos, com delimitação das zonas dos empolamentos através das linhas 1 e 2 (aquecimento por condução). . . .	105
6.30	Pormenor da aplicação de poliestireno expandido moldado (EPS) na envolvente do provete utilizado em laboratório.	105
6.31	Temperaturas atingidas através do aquecimento por condução e radiação ao longo do tempo.	106
6.32	Termograma obtido logo após a retirada da placa de aquecimento (0 minutos), aquecimento por radiação.	106
6.33	Termograma obtido após um período de arrefecimento de 2 minutos, aquecimento por radiação.	107
6.34	Diferencial de temperaturas entre a zona aderente e a zona de empolamentos ao longo do tempo (aquecimento por radiação).	107
6.35	Termograma obtido logo após a retirada da placa de aquecimento (0 minutos), detecção de água.	108
6.36	Avaliação do comportamento da zona aderente, zona com empolamento e zona com água. . . .	109
6.37	Proвете com zona de humedecimento visível à superfície após a injeção de água nessa zona.	109
6.38	Varição da temperatura entre as zonas com anomalias (água ou empolamento) e a zona aderente.	110
6.39	Termografia obtida com a câmara perpendicular ao provete logo após ter sido retirada a placa de aquecimento (0 minutos).	110
6.40	Termografia obtida com a câmara a 60° com a normal à superfície do provete logo após ter sido retirada a placa de aquecimento (0 minutos).	111
6.41	Efeito da alteração do ângulo de observação na temperatura superficial do provete. . . .	111
6.42	Termograma obtido logo após a retirada da placa de aquecimento (0 minutos), análise do provete sem anomalias.	112
6.43	Termograma obtido após um período de arrefecimento de 2 minutos, análise do provete sem anomalias.	112
6.44	Descolamento da membrana de impermeabilização junto ao canto superior direito do provete ensaiado.	113
6.45	Mapeamento das anomalias existentes no provete <i>b</i>).	114
6.46	Locais com maior probabilidade de ocorrência de infiltração de água no provete <i>b</i>). . . .	114
6.47	Imagem termográfica total do provete <i>b</i>) correspondente à detecção de empolamentos. . .	115
6.48	Termograma (esq.) e imagem real (dir.) do rectângulo 1b.	116
6.49	Termograma (esq.) e imagem real (dir.) do rectângulo 2b.	116
6.50	Termograma (esq.) e imagem real (dir.) do rectângulo 3b.	117
6.51	Termograma (esq.) e imagem real (dir.) do rectângulo 4b.	117
6.52	Termograma (esq.) e imagem real (dir.) do rectângulo 5b.	118
6.53	Termograma (esq.) e imagem real (dir.) do rectângulo 6b.	118

6.54	Imagem termográfica total do provete <i>b</i>) correspondente à detecção de água sob o revestimento de impermeabilização - período aquecimento - (esq.) e imagem real (dir.).	120
6.55	Imagem termográfica total do provete <i>b</i>) correspondente à detecção de água sob o revestimento de impermeabilização - período arrefecimento - (esq.) e imagem real (dir.).	121
6.56	Esquema adoptado no exterior para a verificação do erro associado à variação do ângulo de observação.	122
6.57	Termograma do provete <i>b</i>) obtido com um ângulo de observação de 60° com a normal à superfície do provete - período arrefecimento.	122
6.58	Imagem termográfica total da cobertura C5 obtida na campanha do início da tarde - período de aquecimento.	123
6.59	Pormenor 1 com a representação dos empolamentos - período de aquecimento.	124
6.60	Pormenor 2 com a representação dos empolamentos - período de aquecimento.	124
6.61	Pormenor 3 com a representação dos empolamentos - período de aquecimento.	124
6.62	Imagem termográfica total da cobertura C5 obtida na campanha do início da noite - período de arrefecimento.	125
6.63	Pormenor 1 com a representação dos empolamentos - período de arrefecimento.	126
6.64	Pormenor 2 com a representação dos empolamentos - período de arrefecimento.	126
6.65	Pormenor 3 com a representação dos empolamentos - período de arrefecimento.	126
6.66	Identificação de empolamentos na cobertura e no elemento emergente pelo método não destrutivo de termografia de infravermelhos (esq.) e correspondente imagem real (dir.).	128
6.67	Identificação de empolamentos na cobertura pelo método não destrutivo de termografia de infravermelhos (esq.) e correspondente imagem real (dir.).	128
6.68	Identificação de água sob o revestimento de impermeabilização pelo método não destrutivo de termografia de infravermelhos - zona 1 (esq.) e correspondente imagem real (dir.).	129
6.69	Identificação de água sob o revestimento de impermeabilização pelo método não destrutivo de termografia de infravermelhos - zona 2 (esq.) e correspondente imagem real (dir.).	129
6.70	Identificação de empolamentos junto aos acessos para a cobertura pelo método não destrutivo de termografia de infravermelhos (esq.) e imagem real (dir.).	129
B.1	Reflectância direccional obtida para a amostra XC/TLH tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.	B-28
B.2	Reflectância direccional obtida para a amostra XB tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.	B-29
B.3	Reflectância direccional obtida para a amostra XB/BR tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.	B-29
B.4	Reflectância direccional obtida para a amostra XB/TLH tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.	B-30
B.5	Reflectância direccional obtida para a amostra PVC tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.	B-30
B.6	Reflectância direccional obtida para a amostra ASF/BR tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.	B-31
B.7	Reflectância direccional obtida para a amostra ASF/TLH tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.	B-31
B.8	Reflectância direccional obtida para a amostra XEB tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.	B-32

B.9 Reflectância direccional obtida para a amostra XEB/BR tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura. . . . .	.B-32
B.10 Reflectância direccional obtida para a amostra XEB/TLH tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura. . . . .	.B-33
B.11 Reflectância direccional obtida para a amostra XC/BR_P tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura. . . . .	.B-33
B.12 Reflectância direccional obtida para a amostra XC/TLH_P tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura. . . . .	.B-34
B.13 Reflectância direccional obtida para a amostra ASF/BR_P tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura. . . . .	.B-34
B.14 Reflectância direccional obtida para a amostra ASF/TLH_P tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura. . . . .	.B-35
B.15 Variação da reflectância total da amostra XC com o comprimento de onda. . . . .	.B-42
B.16 Variação da reflectância total da amostra XC/BR com o comprimento de onda. . . . .	.B-42
B.17 Variação da reflectância total da amostra XC/TLH com o comprimento de onda. . . . .	.B-43
B.18 Variação da reflectância total da amostra XB com o comprimento de onda. . . . .	.B-43
B.19 Variação da reflectância total da amostra XB/BR com o comprimento de onda. . . . .	.B-44
B.20 Variação da reflectância total da amostra XB/TLH com o comprimento de onda. . . . .	.B-44
B.21 Variação da reflectância total da amostra PVC com o comprimento de onda. . . . .	.B-45
B.22 Variação da reflectância total da amostra ASF com o comprimento de onda. . . . .	.B-45
B.23 Variação da reflectância total da amostra ASF/BR com o comprimento de onda. . . . .	.B-46
B.24 Variação da reflectância total da amostra ASF/TLH com o comprimento de onda. . . . .	.B-46
B.25 Variação da reflectância total da amostra XEB com o comprimento de onda. . . . .	.B-47
B.26 Variação da reflectância total da amostra XEB/BR com o comprimento de onda. . . . .	.B-47
B.27 Variação da reflectância total da amostra XEB/TLH com o comprimento de onda. . . . .	.B-48
B.28 Influência da aplicação de primário na reflectância total da amostra XC/TLH - ensaio espectrofotómetro. . . . .	.B-48
B.29 Influência da aplicação de primário na reflectância total da amostra ASF/BR - ensaio espectrofotómetro. . . . .	.B-49
B.30 Influência da aplicação de primário na reflectância total da amostra ASF/TLH - ensaio espectrofotómetro. . . . .	.B-49
B.31 Termogramas para a detecção de empolamentos obtidos com a câmara termográfica perpendicular ao provete - período 60 minutos, aquecimento condução. . . . .	.B-50
B.32 Termogramas para a detecção de empolamentos obtidos com a câmara termográfica perpendicular ao provete - período 60 minutos, aquecimento condução. . . . .	.B-51
B.33 Termogramas para a detecção de empolamentos obtidos com a câmara termográfica perpendicular ao provete - período 60 minutos, aquecimento condução. . . . .	.B-52
B.34 Termogramas para a detecção de empolamentos obtidos com a câmara termográfica perpendicular ao provete - período 60 minutos, aquecimento radiação. . . . .	.B-53
B.35 Termogramas para a detecção de empolamentos obtidos com a câmara termográfica perpendicular ao provete - período 60 minutos, aquecimento radiação. . . . .	.B-54
B.36 Termogramas para a detecção de água obtidos com a câmara termográfica perpendicular ao provete - período 60 minutos, aquecimento condução. . . . .	.B-55
B.37 Termogramas para a detecção de água obtidos com a câmara termográfica perpendicular ao provete - período 60 minutos, aquecimento condução. . . . .	.B-56
B.38 Termogramas para a detecção de água obtidos com a câmara termográfica perpendicular ao provete - período 60 minutos, aquecimento condução. . . . .	.B-57

B.39	Termogramas para a detecção de empolamentos obtidos com a câmara termográfica a 60° com a normal à superfície do provete - período 60 minutos, aquecimento condução. .B-58
B.40	Termogramas para a detecção de empolamentos obtidos com a câmara termográfica a 60° com a normal à superfície do provete - período 60 minutos, aquecimento condução. .B-59
B.41	Termogramas para a detecção de empolamentos obtidos com a câmara termográfica a 60° com a normal à superfície do provete - período 60 minutos, aquecimento condução. .B-60
B.42	Mapeamento das anomalias existentes no provete <i>a</i>).B-61
B.43	Locais com maior probabilidade de ocorrência de infiltração de água no provete <i>a</i>). . . .B-62
B.44	Termograma do rectângulo 1a - provete <i>a</i>) (esq.) e imagem real correspondente (dir.). . .B-62
B.45	Termograma do rectângulo 2a - provete <i>a</i>) (esq.) e imagem real correspondente (dir.). . .B-63
B.46	Termograma do rectângulo 3a - provete <i>a</i>) (esq.) e imagem real correspondente (dir.). . .B-63
B.47	Termograma do rectângulo 4a - provete <i>a</i>) (esq.) e imagem real correspondente (dir.). . .B-64
B.48	Termograma do rectângulo 5a - provete <i>a</i>) (esq.) e imagem real correspondente (dir.). . .B-64
B.49	Termograma do rectângulo 6a - provete <i>a</i>) (esq.) e imagem real correspondente (dir.). . .B-65
B.50	Imagem termográfica total do provete <i>a</i>) correspondente à detecção de água sob o revestimento de impermeabilização - período aquecimento (esq.) e imagem real (dir.).B-65
B.88	Imagem termográfica total do provete <i>a</i>) correspondente à detecção de água sob o revestimento de impermeabilização - período arrefecimento (esq.) e imagem real (dir.). . B-66

Índice de Quadros

2.1	Exigências de segurança de uma cobertura.	6
2.2	Exigências de habitabilidade de uma cobertura.	6
2.3	Exigências de durabilidade de uma cobertura.	6
2.4	Exigências de economia de uma cobertura.	6
2.5	Classificação de coberturas verdes e factores a respeitar em projecto.	17
2.6	Classificação dos materiais de impermeabilização aplicados em coberturas planas	19
2.7	Características das armaduras aplicadas em membranas de betume polímero, obtidas em ensaios de tracção.	23
2.8	Características das membranas de betume polímero APP, obtidas em ensaios de tracção .	23
2.9	Características das membranas de betume polímero SBS, obtidas em ensaios de tracção .	23
2.10	Características das membranas de PVC em função do tipo de armadura obtidas em ensaios de tracção	25
2.11	Características das membranas de poliolefinas em função do tipo de armadura obtidas em ensaios de tracção	26
2.12	Tensão de rotura das membranas de EPDM em função do tipo de envelhecimento obtidas em ensaios de tracção	27
2.13	Características das membranas de poli-isobutileno obtidas em ensaios de tracção	29
4.1	Vantagens e limitações de cada um dos métodos de aquecimento utilizados na termografia.	58
4.2	Calor específico e inércia térmica da água e do ar.	63
4.3	Condutibilidade térmica e massa volúmica aparente seca da água e do ar.	63
4.4	Difusividade térmica e efusividade térmica da água e do ar.	64
5.1	Características das amostras utilizadas para a realização dos ensaios nos laboratórios de química e fotometria e respectiva simbologia.	66
5.2	Definição das amostras a ensaiar nos laboratórios de química e fotometria consoante o tipo de membrana e a cor da tinta aplicada.	67
5.3	Definição das amostras com aplicação prévia de primário consoante o tipo de membrana e a cor da tinta aplicada.	68
6.1	Valores de emitância das amostras de membranas de betume polímero obtidos através do emissómetro modelo AE.	101
6.2	Condições exteriores medidas no início do ensaio (14 horas).	115
6.3	Condições exteriores medidas no início do ensaio (14 horas e 30 minutos).	119
6.4	Condições exteriores medidas no início do ensaio (19 horas).	120
6.5	Condições exteriores medidas no início da inspecção - célula experimental C5 (período de aquecimento).	125

6.6	Condições exteriores medidas no início da inspeção - célula experimental C5 (período de arrefecimento).	127
6.7	Condições exteriores medidas no início da inspeção - edifício de habitação plurifamiliar (período de aquecimento).	127
A.1	Características técnicas da ThermaCAM P640.	A-1
A.2	Características técnicas da ThermaCAM P640.	A-2
A.3	Características técnicas da ThermaCAM P640.	A-2
A.4	Características técnicas do Luminómetro CS-100.	A-3
A.5	Características técnicas do Luminómetro CS-100.	A-4
A.6	Características técnicas da Esfera integradora LMT RT 500.	A-5
A.7	Características técnicas do espectrofotómetro HITACHI modelo U-3300.	A-6
A.8	Características técnicas do espectrofotómetro HITACHI modelo U-3300.	A-7
A.9	Características técnicas do emissómetro modelo AE.	A-8
B.1	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-1
B.2	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-2
B.3	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-3
B.4	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-4
B.5	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-5
B.6	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-6
B.7	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-7
B.8	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-8
B.9	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-9
B.10	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-10
B.11	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-11
B.12	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-12
B.13	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-13
B.14	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-14
B.15	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-15
B.16	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-16

B.17	Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-17
B.18	Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-18
B.19	Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-19
B.20	Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-20
B.21	Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-21
B.22	Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-22
B.23	Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-23
B.24	Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-24
B.25	Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-25
B.26	Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-26
B.27	Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-27
B.28	Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura	B-28
B.29	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora .	B-36
B.30	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora .	B-37
B.31	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora .	B-38
B.32	Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora .	B-38
B.33	Análise dos resultados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora.	B-39
B.34	Análise dos resultados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora.	B-40
B.35	Análise dos resultados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora.	B-40
B.36	Análise dos resultados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora.	B-41
B.37	Análise dos resultados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora.	B-41

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas

dir.	direita
esq.	esquerda
etc.	et cetera
Fig.	Figura

Siglas

ANPC	Autoridade Nacional de Protecção Civil
APP	Polímero de Polipropileno Atáctico
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CPE	Polietileno Clorado
EPDM	Monómero de Etileno-Propileno-Dieno
FIR	Infravermelhos distantes (Far Infrared)
FPA	Focal Plane Array
FPO	Membranas termoplásticas de poliolefinas flexíveis
IGRA	International Green Roof Association
IV	Radiação Infravermelha
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MIR	Infravermelhos médios (Medium Infrared)
NAICI	Núcleo de Acústica, Iluminação, Componentes e Instalações do LNEC
NCCt	Núcleo de Comportamento das Construções do LNEC
NIR	Infravermelhos próximos (Near Infrared)
NMO	Núcleo de Materiais Orgânicos do LNEC

NRI	Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do LNEC
PIB	Poli-isobutileno
PVC	Policloreto de Vinilo
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios
RGR	Regulamento Geral do Ruído
RRAE	Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios
RSA	Regulamento de Segurança e Acções para estruturas de edifícios e pontes
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização em Edifícios
SBS	Polímero de Estireno-Butadieno-Estireno
SCIE	Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios
TPO	Membranas termoplásticas de poliolefinas
UEAtc	União Europeia para a Apreciação Técnica da Construção
UV	Radiação Ultravioleta
XPS	Poliestireno Expandido Extrudido

Símbolos

a	difusividade térmica, [m^2/s]
b	efusividade térmica, [$J/(K \cdot m^2 \cdot s^{0.5})$]
c	velocidade da luz (no vácuo) [$2.998 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$]
c_p	calor específico, [$J/(kg \cdot K)$]
E	energia de radiação electromagnética, [J]
$E_{\lambda,n}$	poder emissivo espectral do corpo negro, [$W/(m^2 \cdot \mu m)$]
$E_{\lambda,r}$	poder emissivo espectral da superfície real, [$W/(m^2 \cdot \mu m)$]
E_n	poder emissivo total do corpo negro, [W/m^2]
E_r	poder emissivo total do corpo real, [W/m^2]
f	frequência, [Hz]
h	constante de Planck [$6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$]
K	constante de Boltzmann [$1.38 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$]
$L_{méd. amostra}$	luminância média da amostra, ensaio com o luminómetro CS-100, [cd/m^2]

$L_{méd. padrão}$	luminância média do padrão, ensaio com o luminómetro CS-100, [cd/m^2]
$R_{\lambda,n}$	radiância espectral do corpo negro, [$W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$]
R_{λ}	radiância espectral da superfície de um corpo real, [$W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$]
R_n	radiância total do corpo negro, [$W/(m^2 \cdot sr)$]
R	radiância total da superfície de um corpo real, [$W/(m^2 \cdot sr)$]
T	temperatura termodinâmica, [K]
$V(\lambda)$	eficiência luminosa espectral relativa do olho humano, [nm]
α	absortância total hemisférica, [-]
α_{λ}	absortância espectral hemisférica, [-]
$\varepsilon_{\theta,\lambda}$	emitância espectral direccional, [-]
ε_{θ}	emitância total direccional, [-]
ε_{λ}	emitância espectral hemisférica, [-]
ε	emitância total hemisférica, [-]
λ	comprimento de onda, [μm]
λ	condutibilidade térmica, [$W/(m \cdot K)$]
ρ	massa volúmica, [kg/m^3]
ρ	reflectância total da amostra, ensaio esfera integradora LMT RT 500, [%]
$\rho_{calibrada}$	reflectância calibrada do padrão, ensaio com o luminómetro CS-100, [%]
$\rho_{med.}$	reflectância total da amostra para cada medição, ensaio esfera integradora LMT RT 500, [%]
$\rho_{méd.}$	reflectância total da amostra, resultante da média entre todos os valores de reflectância na região do visível, ensaio espectrofotómetro HITACHI modelo U-3300, [%]
ρ_{θ}	reflectância direccional da amostra, ensaio com o luminómetro CS-100, [%]
ρ_{λ}	reflectância espectral hemisférica, [-]
σ	constante de Stefan-Boltzmann [$5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]
τ_{λ}	transmitância espectral hemisférica, [-]
$\Phi_{e,\lambda}$	distribuição de energia espectral de uma lâmpada com filamento de tungsténio a $T_d \approx 2856K$

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

A cobertura é um elemento construtivo de extrema importância na envolvente dos edifícios, pois permite a protecção do interior face aos diversos agentes atmosféricos (como a água da chuva, a radiação solar e o vento).

Em Portugal, a aplicação de coberturas planas tem sido cada vez mais frequente, acompanhando ao longo dos anos a evolução dos materiais e das soluções construtivas. Como este tipo de coberturas apresenta uma disposição horizontal, é necessário ter alguns cuidados adicionais face às coberturas inclinadas, pois os agentes atmosféricos actuam sobre elas de forma mais intensa. Alguns dos cuidados a ter, face à acção da água da chuva, por exemplo, são: a colocação de uma camada de forma, para que exista uma pendente adequada, e a aplicação de dispositivos de drenagem e de um sistema de impermeabilização, garantindo este último a estanquidade da cobertura.

Os materiais de origem betuminosa foram, ao longo do tempo, aplicados frequentemente como camada de impermeabilização de coberturas em terraço. Actualmente, são os materiais prefabricados os que mais se aplicam na impermeabilização deste tipo de soluções, especialmente as membranas de betume polímero. No entanto, apesar do aparecimento destes novos materiais e de disposições construtivas mais eficazes, continuam a surgir anomalias que não permitem o desempenho adequado da cobertura, principalmente ao nível do revestimento de impermeabilização. Estas anomalias são originadas, essencialmente, por erros de concepção e de aplicação, estes últimos agravados pela formação inadequada da mão-de-obra.

A detecção deste tipo de problemas, nomeadamente a existência de água e espaços de ar sob pressão entre a impermeabilização e o suporte, pode ser realizada através da utilização de métodos não destrutivos, como é o caso da termografia de infravermelhos. Com técnicas deste tipo passa a ser possível detectar as anomalias ainda numa fase inicial, possibilitando a reparação do sistema de impermeabilização nas zonas afectadas mais rapidamente.

1.2 Objectivos e metodologia

A realização do presente estudo tem como objectivo principal validar o método não destrutivo de termografia de infravermelhos para a detecção de anomalias em coberturas em terraço. No entanto, também se pretende complementar a informação existente sobre os sistemas de impermeabilização e as suas principais anomalias e, desta forma, possibilitar uma redução dos erros de projecto e de execução, que são as principais causas das anomalias nos revestimentos de impermeabilização.

Este trabalho surge da necessidade de detectar a possível existência de água sob o revestimento de impermeabilização, anomalia existente numa das células experimentais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Com o método de ensaio estudado pretende-se, através da medição da radiação emitida pela superfície da cobertura e consequente representação das temperaturas superficiais, identificar heterogeneidades de temperatura que podem resultar de anomalias no revestimento de impermeabilização, tais como a existência de água ou espaços de ar sob pressão entre a membrana e o suporte.

Como é necessária a introdução de vários parâmetros na câmara termográfica, antes de se iniciar qualquer tipo de registo, procedeu-se inicialmente a um estudo complementar que visou a determinação das propriedades radiativas da superfície das membranas de betume polímero, nomeadamente a reflectância e a emitância. Para o efeito foram preparadas amostras de vários tipos de membranas de impermeabilização, membranas de betume polímero (auto-protegidas e sem qualquer tipo de protecção) e membranas de PVC. Para a determinação da reflectância, e aproveitando um estudo que estava a decorrer sobre o desempenho térmico de tintas reflectantes em paredes, aplicaram-se tintas reflectantes nas amostras das membranas de betume polímero de forma a comprovar a sua eficácia sobre este tipo de materiais. Actualmente, a aplicação das tintas analisadas é muito frequente em coberturas de edifícios, o que torna este estudo complementar bastante importante.

No que diz respeito à detecção de anomalias por termografia de infravermelhos, numa primeira fase, e devido à dificuldade da aplicação do método *in situ*, foram realizados ensaios em laboratório em dois provetes distintos, um com anomalias provocadas e um outro sem qualquer tipo de anomalia. Os provetes utilizados durante os ensaios são constituídos por duas lajetas térmicas, com a face de betão volta para cima, onde foram aplicadas membranas de betume polímero auto-protegidas através de soldadura por chama de modo a representar uma situação real. Num dos provetes houve o cuidado de deixar zonas aderentes e zonas descoladas, para que fosse possível a detecção dessas anomalias através da termografia de infravermelhos.

Numa segunda fase, o método termográfico foi utilizado em dois provetes no exterior e em coberturas *in situ* de forma a validar o estudo realizado em laboratório. Nos provetes do exterior as anomalias foram controladas como nos ensaios em laboratório, mas desta vez os ensaios foram realizados em condições atmosféricas reais. Os provetes utilizados para a análise termográfica no exterior resultaram de ensaios de resistência à sucção do vento, ensaios esses realizados no LNEC. Antes de aplicar o método em estudo nos provetes que se encontravam no exterior, foi realizado previamente um mapeamento das anomalias existentes.

1.3 Organização e estrutura do trabalho

A dissertação está organizada em sete capítulos.

No presente capítulo efectuou-se uma breve contextualização dos assuntos tratados ao longo do texto, onde se dá ênfase à grande importância das coberturas em terraço para a envolvente do edifício, assim como à vantagem da aplicação do método desenvolvido para a detecção de anomalias no revestimento de impermeabilização. Consequentemente, também foram mencionados os objectivos principais e foi desenvolvida uma metodologia do trabalho efectuado, de forma a elucidar a relação existente entre os diversos ensaios e a esclarecer a ordem pela qual são apresentados.

O estado do conhecimento, ou estado da arte, engloba o segundo, o terceiro e o quarto capítulos, onde se referem todos os conceitos necessários à realização dos ensaios assim como à análise e interpretação dos resultados.

No segundo capítulo faz-se referência às várias exigências que é necessário ter em conta neste tipo de coberturas, e no correspondente revestimento de impermeabilização, assim como os vários tipos de coberturas que podem ser concebidas, de acordo com as diferentes camadas, e os vários tipos de sistemas de impermeabilização não-tradicionais que existem actualmente.

De seguida, no terceiro capítulo, são mencionadas as principais anomalias existentes em coberturas em terraço, tanto em zonas singulares como em zona corrente. Este capítulo torna-se importante pois permite uma redução significativa dos erros de execução. Este facto deve-se à apresentação, ao longo do capítulo, de várias disposições construtivas correctas que devem ser aplicadas *in situ*.

O quarto capítulo permite obter bases para uma melhor compreensão do método não destrutivo de termografia de infravermelhos, pois apresentam-se os princípios da transmissão de calor por radiação e os factores a considerar durante a aplicação do método, em termos de aquecimento, ou em termos dos condicionantes que devem ser tidos em conta.

No quinto capítulo apresenta-se todo o desenvolvimento experimental, onde se mencionam os procedimentos adoptados durante os ensaios (desde a preparação dos provetes até à sua realização) e os tipos de equipamentos utilizados.

O sexto capítulo apresenta os resultados obtidos, tanto para os ensaios em laboratório como para os realizados *in situ*, assim como a respectiva análise.

No sétimo capítulo são mencionadas todas as conclusões retiradas ao longo do estudo efectuado.

Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas, consideradas ao longo do trabalho, e os anexos, onde se inclui informação complementar.

Capítulo 2

Sistemas de revestimento de coberturas em terraço

2.1 Exigências funcionais

2.1.1 Generalidades

Uma cobertura constitui a parte superior da envolvente exterior de um edifício, permitindo a protecção do seu interior relativamente à acção de agentes externos, como é o caso da radiação solar, da chuva e do vento. Segundo o DL (1951), artigo 43.º, as coberturas em terraço devem ter uma pendente mínima de 1%, de forma a garantir um escoamento rápido e completo das águas pluviais e de lavagem. A inclinação máxima pode variar entre 8% a 15%, consoante os países. Quando se adopta este tipo de coberturas a sensibilidade à acção dos agentes atmosféricos é muito elevada. A grande susceptibilidade deste tipo de solução deve-se à incidência com que esses agentes actuam, que ocorre de forma mais intensa e directa do que nos restantes elementos construtivos [RAPOSO, 2009].

Para que seja possível manter o desempenho adequado de uma cobertura é necessário satisfazer as suas exigências funcionais. A satisfação dessas exigências irá depender do seu comportamento físico relativamente aos agentes a que estará sujeita durante a sua vida útil [RAPOSO, 2003]. Por isso, os materiais que constituem a cobertura são essenciais para a sua durabilidade. O sistema de impermeabilização, em particular, quando deteriorado, pode levar ao aparecimento de anomalias que afectam a durabilidade de todo o edifício, daí que esta característica seja uma exigência essencial [DIAS, 2008].

Segundo Raposo (2003), o conceito de exigência funcional pode ser descrito como um requisito colocado a parte de um edifício ou ao seu todo, tendo em vista a satisfação de determinadas necessidades dos utentes (fisiológicas, psicológicas e sócio-económicas).

2.1.2 Exigências funcionais da cobertura

A forma como as exigências funcionais são agrupadas pode ser diversa. Alguns autores divergem na proposta apresentada; no entanto, o conteúdo é essencialmente mantido entre elas. Desta forma, admite-se que numa cobertura as exigências são agrupadas em três grandes classes: exigências de segurança, exigências de habitabilidade e exigências de durabilidade. Lopes (1994b) também refere um quarto grupo, como complemento, designado por exigências de economia.

De seguida são apresentados os quadros 2.1 a 2.4 onde serão referidas as quatro classes de exigências funcionais, relativas às coberturas, assim como as sub-categorias que elas englobam.

Quadro 2.1: Exigências de segurança de uma cobertura [LOPES, 1994b].

Exigências de Segurança
Segurança estrutural
Segurança contra incêndios
Resistência das camadas não estruturais da cobertura a outras acções

Quadro 2.2: Exigências de habitabilidade de uma cobertura [LOPES, 1994b].

Exigências de Habitabilidade
Estanquidade
Conforto térmico
Conforto acústico
Conforto visual
Aspecto
Disposição de acessórios e equipamentos

Quadro 2.3: Exigências de durabilidade de uma cobertura [LOPES, 1994b].

Exigências de Durabilidade
Conservação das qualidades
Limpeza, manutenção e reparação

Quadro 2.4: Exigências de economia de uma cobertura [LOPES, 1994b].

Exigências de Economia
Limitação do custo global
Economia de energia

Estabelecendo uma relação entre as exigências funcionais e os principais tipos de camadas existentes numa cobertura em terraço obteve-se o esquema da figura 2.1.

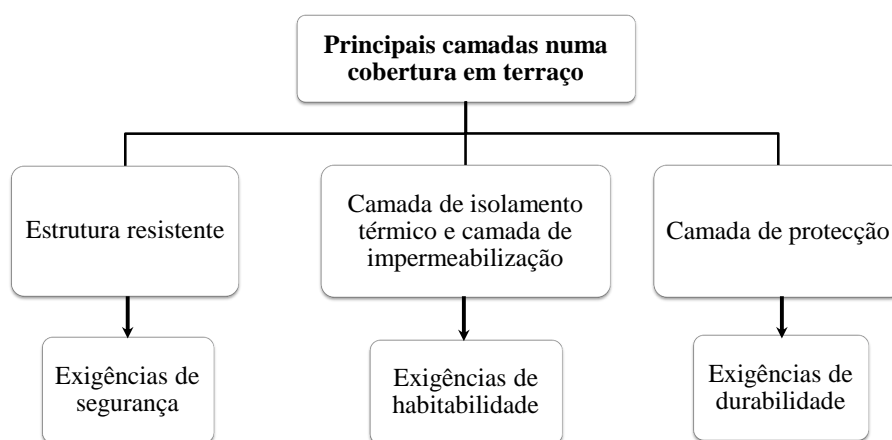


Fig. 2.1: Relação entre as principais camadas de uma cobertura em terraço e as exigências funcionais a verificar.

2.1.3 Exigências funcionais do revestimento de impermeabilização

Os revestimentos de impermeabilização também podem apresentar uma classificação das suas exigências funcionais, à semelhança do que foi exposto relativamente às coberturas. Essa classificação apresenta diversas variantes adoptando-se, por isso, a proposta apresentada pelas Directivas Gerais UEAtc para homologação de revestimentos de impermeabilização de coberturas [LOPES, 1994b].

As classes definidas para as exigências funcionais dos revestimentos de impermeabilização são as seguintes:

- exigências de segurança;
- exigências de aptidão ao uso;
- exigências relativas à conservação das qualidades;
- exigências relativas à manutenção e reparação.

Nos pontos seguintes são apresentadas as exigências funcionais alusivas aos revestimentos de impermeabilização, assim como as normas e regulamentos que devem ser considerados durante a fase de projecto.

Exigências de segurança

i) Acção do vento

O revestimento de impermeabilização juntamente com os restantes elementos da cobertura devem resistir à sucção provocada pelo vento. Relativamente aos regulamentos e normas, devem ser tidos em consideração o RSA e a NP EN 1991-1-4 (2010)¹.

ii) Segurança contra incêndio

Tanto a cobertura como o revestimento de impermeabilização devem apresentar características que impeçam a propagação de chamas à superfície, a penetração do fogo e, em certas circunstâncias, a inflamabilidade dos materiais. Devem ser verificados em projecto as seguintes normas e regulamentos: SCIE, prEN 1187-1-1993², prEN 1187-2-1994³, E365 - 1990 LNEC⁴, Notas técnicas da ANPC⁵ e NP EN 60695-9-1:2008 (Ed. 1)⁶.

iii) Saúde dos utilizadores

O revestimento de impermeabilização deve respeitar as normas vigentes no que diz respeito à libertação de gases tóxicos ou outro tipo de produtos que ponham em risco a saúde utilizadores. Relativamente às

¹O Eurocódigo 1 Parte 1-4 fornece orientações para a determinação das acções do vento natural, a utilizar no projecto estrutural de edifícios, como é o caso das coberturas.

²External fire exposure to roofs - part 1: method of test simulating exposure to burning brands, without wind or supplementary radiant heat.

³External fire exposure to roofs - part 2: method of test simulating exposure to burning brands, with wind and supplementary radiant heat.

⁴Segurança contra incêndio. Reacção ao fogo dos materiais de construção. Critérios de classificação.

⁵As Notas técnicas, da ANPC, são um conjunto de especificações que têm como objectivo complementar a legislação do SCIE e definir de forma clara as exigências de segurança que devem ser consideradas na temática da segurança contra incêndios em edifícios.

⁶Ensaio relativos aos riscos de fogo. Parte 9-1: Propagação das chamas na superfície. Linhas directrizes gerais (IEC 60695-9-1:2005).

normas e regulamentos a verificar na fase de projecto referem-se a NP EN 60695-7-1:2008 (Ed. 1)⁷ e a NP EN 60695-6-1:2008 (Ed. 1)⁸.

Exigências de aptidão ao uso

i) Estanquidade à água

Tem como objectivo impedir a passagem da água através da cobertura. Deve analisar-se segundo duas vertentes: a de funcionamento global da cobertura e a de funcionamento individual dos seus elementos constituintes, como é o caso do revestimento de impermeabilização. Na fase de projecto deve-se garantir o cumprimento da NP EN 1928:2004 (Ed. 1)⁹.

ii) Aspecto

Característica exclusivamente estética, deve garantir-se uniformidade do acabamento sem existência de defeitos. Deve ser verificada a NP EN 1850-1:2001 (Ed. 1)¹⁰ em fase de projecto.

iii) Ocorrência de manchas

O revestimento de impermeabilização não deve ser constituído por componentes que provoquem manchas na fachada, na cobertura ou no interior do edifício.

iv) Conservação da resistência mecânica

A resistência mecânica deve ser suficiente para conservar as qualidades da impermeabilização aquando da actuação de agentes que possam modificar as suas características.

Exigências relativas à conservação das qualidades

O revestimento de impermeabilização deve conservar as suas qualidades, nomeadamente a estanquidade, de forma satisfatória durante um período mínimo de 10 anos, como refere Alves (2013). A manutenção dessas características deve ser garantida aquando a actuação dos principais agentes alteradores. É possível manter essas propriedades através da imposição de exigências que serão referidas de seguida.

i) Efeito dos agentes ambientais

A impermeabilização e a respectiva protecção devem resistir aos efeitos provocados:

- Pelo vento, onde se deve ter em conta a perda de aderência entre o sistema e o suporte, a perda de aderência das juntas entre membranas, os descolamentos e perda de coesão dos materiais, especialmente os compósitos.

⁷Ensaio relativo aos riscos de fogo. Parte 7-1: Toxicidade dos efluentes do fogo. Linhas directrizes gerais (IEC 60695-7-1:2004).

⁸Ensaio relativo ao risco de fogo. Parte 6-1: Opacidade dos fumos. Linhas directrizes gerais (IEC 60695-6-1:2005).

⁹Membranas de impermeabilização flexíveis. Membranas betuminosas, de plástico e de borracha para impermeabilização de coberturas. Determinação da estanquidade à água.

¹⁰Membranas de impermeabilização flexíveis. Determinação de defeitos de aspecto. Parte 1: Membranas betuminosas de impermeabilização de coberturas.

- Pela temperatura, onde se deve manter as características para variações graduais, considerando-se variações entre os -20°C e os 80°C , assim como para variações bruscas na ordem dos 60°C .
- Pela radiação solar, especialmente a radiação ultravioleta (UV) e infravermelha (IV), mantendo assim as características mais relevantes. Estes efeitos manifestam-se essencialmente através do envelhecimento dos materiais e da rápida alteração de cor que estes exibem.
- Pela água, quer se trate de precipitação, água estagnada ou humidade na face interior do revestimento. Deve ter-se em consideração a alteração das características do revestimento, nomeadamente a alteração das armaduras, os movimentos de origem higrotérmica do suporte, a falta de aderência entre o revestimento e o suporte ou entre membranas, a erosão da camada superficial e as alterações provocadas pela formação de gelo ou pelo movimento da água com os materiais sólidos.
- Pelos agentes químicos, resultantes da exposição atmosférica (em ambientes normais, marítimos ou industriais) ou então provenientes da aplicação da impermeabilização em locais específicos, como é o caso dos parques de estacionamento.

Em fase de projecto, neste caso, deve ter-se em consideração as seguintes normas: NP EN 1296:2004 (Ed. 1)¹¹ e NP EN 1297:2008 (Ed. 1)¹².

ii) Compatibilidade entre materiais

O revestimento de impermeabilização deve ser compatível entre as várias camadas que constitui e com as restantes camadas da cobertura. A compatibilidade toma importância acrescida entre camadas contíguas.

iii) Ações microbiológicas e macrobiológicas

A impermeabilização deve apresentar resistência à acções microbiológicas, como é o caso do desenvolvimento de fungos, bolores, bactérias e criptogâmicas, assim como resistência à acções macrobiológicas, como o desenvolvimento de plantas e ataques de insectos, pássaros e pequenos roedores. Em fase de projecto deve verificar-se as normas em vigor que permitam a análise de algumas dessas resistências, como é o caso da NP EN 13948:2008 (Ed. 1)¹³

iv) Deformações da estrutura resistente

A estrutura resistente pode deformar-se perante movimentos cíclicos de origem térmica (alongamento-encurvadura), ou por deformações originadas pelas solicitações a que está sujeita. Para que as exigências sejam verificadas o revestimento de impermeabilização deve ser capaz de acompanhar satisfatoriamente os movimentos do suporte.

¹¹Membranas de impermeabilização flexíveis. Membranas betuminosas, de plástico e de borracha para impermeabilização de coberturas. Método de envelhecimento artificial por exposição de longa duração a temperatura elevada.

¹²Membranas de impermeabilização flexíveis. Membranas betuminosas, de plástico e de borracha armadas para impermeabilização de coberturas. Método de envelhecimento artificial por exposição combinada de longa duração à radiação UV, à temperatura elevada e à água.

¹³Membranas de impermeabilização flexíveis. Membranas betuminosas, de plástico e de borracha para impermeabilização de coberturas. Determinação da resistência à penetração de raízes.

v) Cargas de serviço

O revestimento de impermeabilização, conjuntamente com a estrutura resistente e a eventual camada de protecção, devem ser capazes de resistir às cargas de serviço a que a cobertura está sujeita. As cargas de serviço dependem essencialmente do tipo de acessibilidade da cobertura. Deve-se assim garantir a resistência da impermeabilização ao punçoamento estático, resultante do peso de equipamentos e circulação de pessoas, e ao punçoamento dinâmico que é originado usualmente pela queda de objectos. Na fase de projecto devem ser cumpridas as normas vigentes, sendo a NP EN 12730:2004 (Ed. 1)¹⁴ de grande importância.

vi) Circulação de pessoas

Deve ser projectada uma camada de protecção para a impermeabilização sempre que seja prevista a circulação de pessoas regularmente ou quando o acesso é condicionado, permitindo apenas o acesso para reparação ou manutenção.

Exigências relativas à manutenção e reparação

Para que seja garantido o período espectável para o revestimento de impermeabilização é necessário proceder à manutenção regular da cobertura, tanto em zona corrente como nos pontos singulares, e optar por reparação sempre que os materiais se encontrem deteriorados e possam colocar em causa a estanquidade da impermeabilização.

2.2 Coberturas em terraço: camadas e respectivas funções

2.2.1 Generalidades

As coberturas em terraço apresentam como característica principal a disposição dos diversos materiais constituintes em camadas horizontais ou próximas desta posição. A ordem e o número de camadas numa determinada cobertura vai depender da solução adoptada, podendo haver uma ligeira modificação na sequência em que estas são aplicadas ou até mesmo supressão de algumas delas [LOPES, 2004].

Em geral, as camadas com maior importância são aquelas que permitem a verificação das exigências funcionais neste tipo de coberturas como é o caso da estrutura resistente, da camada de isolamento térmico, do revestimento de impermeabilização e da camada de protecção. Destacam-se ainda a camada de regularização, a camada de forma, a barreira pára-vapor, a camada de dessolidarização e as barreiras de protecção térmica e separação química, estas últimas em soluções particulares.

Em terraços ajardinados, para além das camadas já mencionadas, torna-se necessária a aplicação de uma camada drenante, de uma camada filtrante e da camada de terra vegetal com a respectiva vegetação.

As camadas descritas de seguida serão apresentadas por ordem ascendente de aplicação *in situ*.

¹⁴Membranas de impermeabilização flexíveis. Membranas betuminosas, de plástico e de borracha para impermeabilização de coberturas. Determinação da resistência ao punçoamento estático.

2.2.2 Principais camadas

Estrutura resistente

A estrutura resistente é constituída geralmente por uma estrutura rígida, em betão, ou flexível, no caso de chapas metálicas nervuradas ou pranchas de madeira [LOPES, 1994b]. As suas principais funções são o suporte das camadas sobrejacentes e, em alguns casos, da camadas subjacentes e a resistência às acções variáveis como as sobrecargas, o vento e a neve [LOPES, 2004].

Camada de regularização

A camada de regularização é normalmente de espessura reduzida e constituída por argamassa. Permite a uniformização da superfície da estrutura resistente, quando necessário, de forma a estar em condições adequadas para receber a camada seguinte.

Camada de forma

A função desta camada é garantir a pendente pretendida para a cobertura. De forma a não provocar um peso excessivo sobre a estrutura resistente é conveniente que a camada seja constituída por betão leve. Ao introduzir materiais no betão com baixa condutibilidade térmica como a argila expandida, o aglomerado de cortiça e o poliestireno expandido extrudido (XPS), a camada pode contribuir também para a função de isolamento térmico [RAPOSO, 2009].

Barreira pára-vapor

A barreira pára-vapor é necessária nas situações em que a camada de isolamento térmico é aplicada antes do revestimento de impermeabilização, cobertura do tipo tradicional. Impede a passagem do vapor de água para as camadas sobrejacentes, de forma a evitar a ocorrência de condensações internas quando este atinge superfícies mais frias, como é o caso da superfície entre o isolamento térmico e o revestimento de impermeabilização. Quando a camada de forma assume a função de isolante térmico a barreira pára-vapor deve ser colocada logo após a aplicação da camada de regularização [LOPES, 1994b].

É de salientar que a ocorrência de condensações internas leva ao aparecimento de água nos elementos construtivos e, como consequência, à deterioração destes [HENRIQUES e RATO, 2004]. Essa questão é de extrema importância especialmente quando se têm isolantes térmicos de *porosidade aberta*¹⁵, como é o caso da lã de rocha e do aglomerado de cortiça.

Camada de isolamento térmico

A função desta camada é garantir as exigências de conforto térmico, de forma a reduzir as trocas de calor entre o ambiente exterior e o ambiente interior, como indicado em Lopes (1994b).

No caso de uma cobertura do tipo tradicional uma maior espessura do isolamento térmico agrava, geralmente, a ocorrência de condensações internas que, posteriormente, pode levar à degradação do material. Uma maior espessura faz com que exista um maior diferencial de temperatura entre a parte inferior e a parte superior do isolamento térmico. Como a superfície superior fica mais fria implica que se tenham pressões de saturação mais baixas e, como consequência, uma maior probabilidade de

¹⁵*Porosidade aberta* - A generalidade dos elementos de construção tem porosidade aberta. Nestes materiais os vazios comunicam entre si permitindo a circulação de fluidos no seu interior. O material é mais ou menos permeável em função da dimensão e geometria dos poros.

ocorrência de condensações internas. Assim, de acordo com Henriques e Rato (2004), deve ser mantido um equilíbrio entre a espessura necessária para garantir as exigências de conforto térmico e a espessura que leve à diminuição do risco de ocorrência de condensações internas.

Revestimento de impermeabilização

A principal função desta camada é garantir as exigências de estanquidade da cobertura. Para além de impedir a passagem de água para as camadas inferiores, deve também apresentar outras qualidades tais como a resistência à sucção do vento e a capacidade de deformação quando existe movimento do suporte, quer se trate do isolamento térmico ou da camada de regularização [LOPES, 1994b]. Como se trata de uma camada onde surgem frequentemente anomalias, esta deve ser devidamente protegida das acções a que está sujeita na sua vida útil, tanto acções mecânicas como climáticas.

Camada de dessolidarização / Camada Separadora

A camada de dessolidarização é aplicada, geralmente, sobre a superfície do revestimento de impermeabilização. Tem como principal função reduzir o contacto entre a impermeabilização e a camada de protecção, evitando assim possíveis anomalias resultantes dessa interacção, sendo que a origem das anomalias pode variar consoante o tipo de protecção aplicada. A aplicação de uma camada de protecção pesada rígida poderia originar, a título de exemplo, movimentos diferenciais de origem térmica em relação ao revestimento de impermeabilização e posterior rasgamento. Isto, caso não fosse colocada a camada de dessolidarização. Já no caso de ser aplicada uma camada de protecção pesada com material a granel poderia acontecer que, com a não aplicação da camada de dessolidarização, houvesse perfuração da impermeabilização originada pelas partes mais angulosas do material ou então perda de ductilidade da membrana, devido à remoção do material solto pela acção do vento.

Esta camada também pode ser utilizada para evitar a aderência entre o revestimento de impermeabilização e o seu suporte [ROCHA, 2008].

Camada de protecção mecânica

Esta camada tem como papel principal assegurar a protecção do revestimento de impermeabilização relativamente a acções mecânicas, provocadas pela circulação de pessoas e veículos, e a acções climáticas, como a exposição à radiação solar, ao vento, à precipitação e a variações de temperatura.

O tipo de camada de protecção a adoptar irá depender das necessidades encontradas em projecto.

Quando é preciso garantir a protecção do revestimento de impermeabilização, relativamente a variações de temperatura, a solução a adoptar passa pela escolha do tipo de cobertura. Nesses casos, a solução mais eficiente é aquela em que a impermeabilização é aplicada antes da camada de isolamento térmico, ficando protegida termicamente. Ao ser necessária uma protecção com resistência a acções mecânicas deve-se ter especial atenção ao tipo de acessibilidade da cobertura. As soluções a adoptar podem passar pela colocação de uma camada de material a granel, ou então pela aplicação de uma camada rígida, formada por lajetas ou betonilha. A betonilha poderá ser armada ou não, consoante o tipo de circulação definido em projecto.

Barreiras de protecção térmica e separação química

Este tipo de barreiras podem ser aplicadas *in situ* ou podem ser incorporados no próprio material impermeabilizante em fábrica [LOPES, 1994b].

Em alguns casos, o suporte do revestimento da impermeabilização é muito sensível quando sujeito a temperaturas elevadas. Ao aplicar-se a impermeabilização utilizando o maçarico, por exemplo, essa susceptibilidade surge e, por isso, deve-se recorrer a barreiras de protecção térmica para evitar a deterioração desse mesmo suporte. Pode também existir incompatibilidade química entre o revestimento de impermeabilização e as camadas contíguas a este. Nesse caso opta-se pela colocação de barreiras de separação química de forma a evitar a migração de componentes entre essas camadas e degradações que daí poderiam resultar.

2.3 Classificação das coberturas em terraço

2.3.1 Generalidades

A classificação das coberturas em terraço pode ser realizada sob vários pontos de vista. A proposta de Lopes (2004) foca-se nos principais parâmetros a considerar durante o projecto e execução das várias camadas. Assim a cobertura plana pode ser classificada da seguinte forma:

- quanto à acessibilidade;
- quanto ao tipo de camada de protecção mecânica;
- quanto às soluções de impermeabilização;
- quanto à posição da camada de isolamento térmico;
- quanto à pendente;
- quanto à estrutura resistente.

2.3.2 Classificação quanto à acessibilidade

Quanto ao tipo de acessibilidade de uma cobertura Lopes (2004) define as seguintes classes:

- coberturas não acessíveis ou de acessibilidade limitada;
- coberturas acessíveis a pessoas;
- coberturas acessíveis a veículos;
- coberturas especiais.

Coberturas não acessíveis ou de acessibilidade limitada

São coberturas onde o acesso a pessoas só deve ser permitido para acções de manutenção ou reparação. No entanto, apesar da acessibilidade ser condicionada, deve ser previsto um caminho de circulação de forma a garantir-se a máxima protecção mecânica do revestimento de impermeabilização e do isolamento térmico [ALVES, 2013].

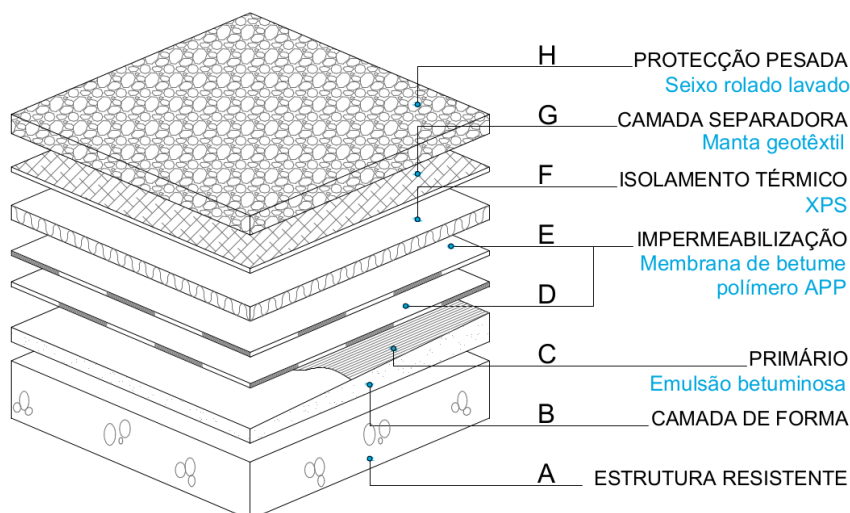


Fig. 2.2: Cobertura de acesso limitado com aplicação do isolante térmico acima do revestimento de impermeabilização, cobertura do tipo invertida [IMPERALUM, sdb].

Coberturas acessíveis a pessoas

Neste tipo de coberturas apenas é permitida a circulação e a permanência de pessoas.

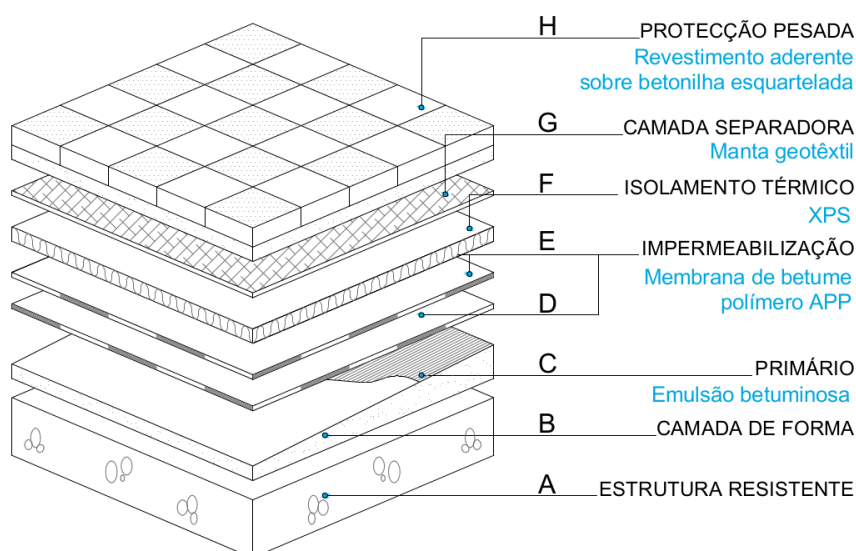


Fig. 2.3: Cobertura acessível a pessoas com aplicação do isolante térmico acima do revestimento de impermeabilização, cobertura do tipo invertida [IMPERALUM, sdb].

A utilização de betonilhas ou argamassas como assentamento da protecção pesada exige cuidados especiais. Um dos cuidados a ter, é não aplicar a camada de betonilha ou de argamassa de forma contínua. Por isso, nestas camadas, devem ser realizadas juntas de esquadrelamento definindo painéis com dimensão não superior a $4m \times 4m$. A junta cobrirá toda a espessura dos acabamentos e da respectiva camada de assentamento, seja ela betonilha ou argamassa [LNEC, 2012].

Como alternativa ao revestimento pesado aderente existe também o revestimento pesado não aderente, independente do suporte. Nesses casos a protecção pesada é constituída por placas pré-fabricadas (de betão, material cerâmico ou madeira) aplicadas sobre apoios pontuais. Os suportes utilizados permitem a criação de uma pequena caixa de ar que facilita o escoamento das águas pluviais para os respectivos dispositivos de drenagem. No entanto, a ventilação da caixa de ar formada pelo revestimento é condicionada pela posição do isolamento térmico.

Numa situação corrente, em que a caixa de ar é criada entre a camada de dessolidarização e o revestimento sobrelevado, o facto da caixa de ar ser fortemente ventilada não apresenta grande relevância pois, dessa forma, o isolamento térmico continua a contribuir ao nível da eficiência térmica na cobertura.

Caso sejam utilizadas lajetas térmicas, o mesmo não se verifica. Como estas são colocadas sobre os apoios pontuais o isolamento térmico fica situado acima da caixa de ar, o que faz com que esta não possa ser fortemente ventilada. Se o espaço de ar fosse fortemente ventilado, o isolamento térmico deixaria de contribuir a nível térmico, obtendo-se um valor de coeficiente de transmissão térmica (U) na cobertura bastante elevado. Por isso, nos casos em que são aplicadas lajetas térmicas, as juntas entre placas devem garantir a estanquidade ao ar ou as lajetas não devem ser sobrelevadas.

Coberturas acessíveis a veículos

Nesta secção agrupam-se as coberturas acessíveis a veículos ligeiros e as coberturas acessíveis a veículos pesados. A distinção entre os dois tipos de veículos é realizada através da carga transmitida por eixo [LOPES, 2004].

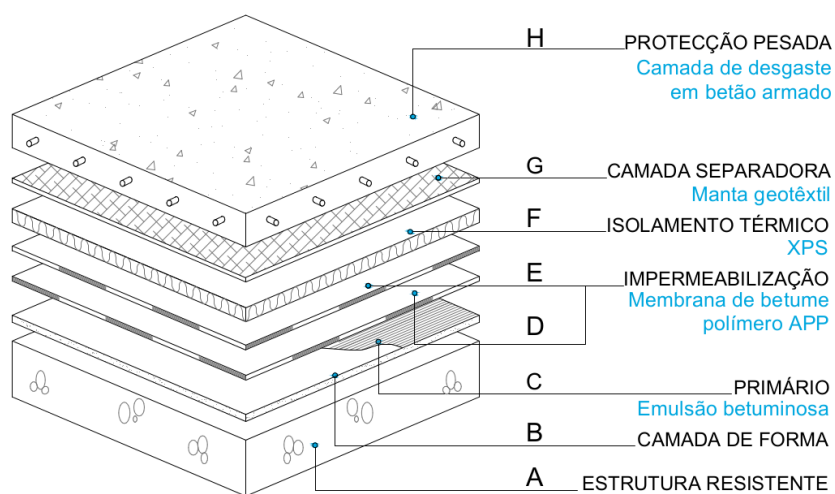


Fig. 2.4: Cobertura acessível a veículos com aplicação do isolante térmico acima do revestimento de impermeabilização, cobertura do tipo invertida [IMPERALUM, sdb].

Coberturas especiais

Neste tipo de coberturas inserem-se as coberturas verdes e aquelas que são ocupadas em grande parte por equipamentos técnicos e industriais.

Uma cobertura verde pode trazer grandes benefícios ao nível da sustentabilidade da construção. Este tipo de solução permite a melhoria de certas características da cobertura de forma económica, assim como um

aumento dos espaços verdes em zonas urbanas. Listam-se de seguida os benefícios aos níveis do edifício e urbanos.

Benefícios ao nível do edifício:

- Protecção do sistema de impermeabilização aumentando, dessa forma, a vida útil da cobertura.
- Melhoria no isolamento térmico, permitindo uma diminuição dos gastos a nível energético (menor necessidade de climatização).
- Redução do ruído ao colocar a camada vegetal, possibilitando uma melhoria no isolamento acústico.
- Melhoria do aspecto estético em relação a uma cobertura plana corrente e mais espaço útil para áreas de lazer, no caso de ser acessível.

Benefícios a nível urbano:

- Criação de habitats naturais para animais e plantas.
- Aumento da retenção de águas pluviais. Assim o caudal de águas pluviais drenado para a rede urbana é reduzido e existe aproveitamento dessa água para ciclos de rega.
- Filtragem do ar o que leva a uma contribuição na melhoria do clima urbano.
- Equilíbrio urbanístico em termos de distribuição de espaços verdes.

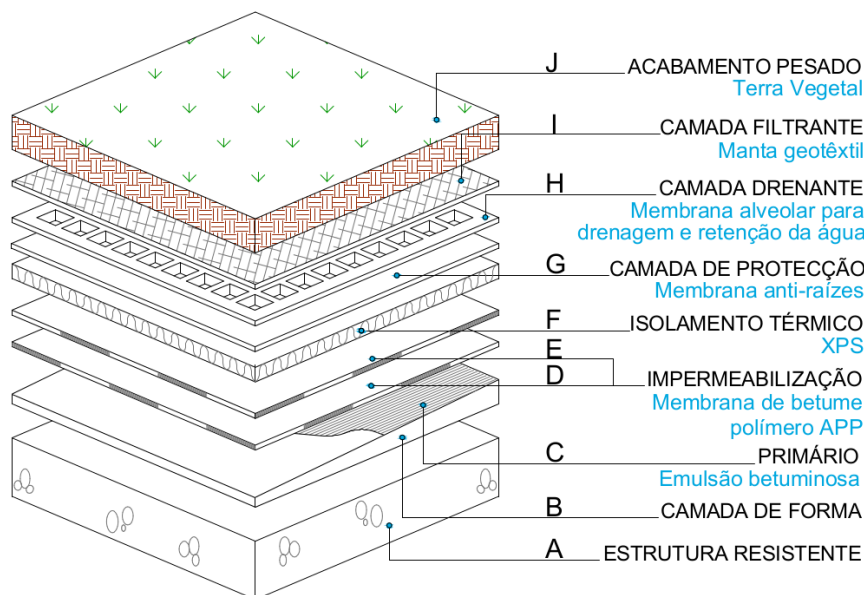


Fig. 2.5: Cobertura ajardinada com aplicação do isolante térmico acima do revestimento de impermeabilização, cobertura do tipo invertida [IMPERALUM, sdb].

A associação internacional de coberturas verdes, IGRA (sd), divide este tipo de coberturas em três classes distintas:

- cobertura verde extensiva;
- cobertura verde semi-intensiva;
- cobertura verde intensiva.

As coberturas verdes extensivas são adequadas nos casos em que a estrutura resistente não está preparada para aguentar grandes cargas. São constituídas por uma espessura reduzida de terra vegetal e, por isso, adequadas para plantas de baixo porte que se adaptem facilmente a finas camadas de solo, que sejam resistentes à seca e que necessitem de pouca manutenção. Este tipo de cobertura verde é, geralmente, de acessibilidade limitada, permitindo apenas acessos para manutenção, e é aquele que apresenta custos mais reduzidos.

As coberturas verdes semi-intensivas apresentam uma maior espessura de terra vegetal, comparando com o tipo extensivo, o que leva a uma maior carga aplicada sobre a estrutura resistente. A maior espessura de terra vegetal permite a aplicação de plantas de maiores dimensões como é o caso de pequenos arbustos.

As coberturas verdes intensivas são geralmente acessíveis a pessoas. Neste caso, a cobertura funciona como espaço de lazer, o que leva a necessidades acrescidas de manutenção, rega e fertilização. Por serem coberturas destinadas a espaços de lazer podem-se utilizar espécies como relva, plantas perenes, arbustos e árvores de médio porte.

No quadro 2.5 apresentam-se as várias classificações de coberturas verdes e as suas principais características.

Quadro 2.5: Classificação de coberturas verdes e factores a respeitar em projecto [IGRA, sd].

	Extensiva	Semi-Intensiva	Intensiva
Manutenção	Baixa	Periódica	Elevada
Rega	Esporádica	Periódica	Regular
Plantas	Perenes de pequeno porte e Sedum	Gramíneas ornamentais e pequenos arbustos	Relva, arbustos e árvores de médio porte
Espessura de terra vegetal [m]	0.06 a 0.20	0.12 a 0.25	0.15 a 0.4
Peso [kg/m ²]	60 a 150	120 a 200	180 a 500
Custo	Reduzido	Médio	Elevado
Tipo de utilização	Camada de protecção com funções ecológicas	Camada de protecção com maior diversidade de espécies	Zona de lazer

2.3.3 Classificação quanto ao tipo de camada de protecção do sistema de impermeabilização

No que diz respeito ao tipo de protecção utilizada numa cobertura tem-se os seguintes grupos:

- coberturas sem protecção;
- coberturas com protecção leve;
- coberturas com protecção pesada.

Coberturas sem protecção

Nestes casos o sistema de impermeabilização não apresenta qualquer tipo de protecção. Pode, no entanto, ser revestido com certos materiais, como é o caso do filme de polietileno, para evitar que exista aderência entre as superfícies da membrana quando esta ainda de se encontra em rolo.

Coberturas com protecção leve

A protecção leve num revestimento de impermeabilização pode ser aplicada tanto em obra, como em fábrica.

O revestimento de impermeabilização, quando a protecção é aplicada em fábrica, designa-se de auto-protégido. Nos casos mais correntes essa protecção é constituída por granulado mineral, como por exemplo lamelas de xisto, mas também é possível encontrar protecções de materiais metálicos ou orgânicos.

Quando a protecção é aplicada *in situ* pode-se recorrer a pintura, através de tintas de alumínio, ou então à aplicação de materiais granulares, utilizando uma camada de betume de forma a garantir a aderência à membrana. Esta última solução é muito pouco utilizada hoje em dia, pois apresenta um custo elevado associado à mão-de-obra [LOPES, 2004].

Coberturas com protecção pesada

No que diz respeito à protecção pesada em coberturas planas, pode-se adoptar soluções em que é utilizada uma camada rígida ou então soluções em que se utilizem materiais a granel. Em qualquer uma das soluções os materiais utilizados são aplicados em obra, embora possam ser adoptados materiais prefabricados para o efeito.

Como protecção pesada rígida utilizam-se normalmente betonilhas, armadas ou não, ladrilhos cerâmicos ou hidráulicos aplicados sobre betonilha, assim como placas prefabricadas. Este tipo de solução é o mais adequado quando de se trata de coberturas acessíveis, quer seja a pessoas ou a veículos.

Nas soluções em que são utilizados materiais soltos os mais recomendados são os godos, como calhau ou seixo. Como apresentam formas mais arredondadas diminuem, de forma significativa, as acções de punçoamento sobre a camada subjacente.

2.3.4 Classificação quanto às soluções de impermeabilização

As coberturas em terraço também podem ser classificadas de acordo com o revestimento de impermeabilização utilizado. Os vários tipos de materiais aplicados repartem-se em dois grandes grupos, tradicionais ou não tradicionais.

No primeiro grupo inserem-se todas as soluções que tenha um longo período de utilização, ou seja, produtos normalizados, com técnicas de aplicação completamente dominadas e desempenho conhecido. Fazem parte do segundo grupo os materiais mais recentes. Neste tipo de soluções o conhecimento do desempenho *in situ* ainda é muito limitado e, por esse motivo, necessitam de estudos algo complexos, de forma a avaliar a viabilidade e a adequabilidade à função a que se destinam.

Quadro 2.6: Classificação dos materiais de impermeabilização aplicados em coberturas planas [LOPES, 2004].

Materiais tradicionais	Materiais betuminosos	Betume de destilação directa, betume oxidado ou insuflado
	Produtos elaborados	Emulsões betuminosas, pinturas betuminosas e produtos betuminosos modificados
	Produtos prefabricados	Feltros betuminosos, telas betuminosas e membranas betuminosas armadas
Materiais não-tradicionais	Produtos em forma líquida ou pastosa	Emulsões de betume modificado, materiais plásticos e resinas
	Produtos prefabricados	Membranas de betume modificado, membranas com base em borracha e membranas plásticas

A ligação ao suporte, em superfície corrente, pode ser realizada através de sistemas aderentes, sistemas semi-aderentes e sistemas independentes.

Para garantir a aderência, no caso de soluções com produtos prefabricados, podem utilizar-se vários tipos de produtos de colagem, a quente ou a frio, ou então recorrer ao amolecimento da superfície inferior do material e, posteriormente, fazer pressão sobre o suporte. No segundo caso a fusão é conseguida através da chama com maçarico ou de ar quente.

Nos revestimentos semi-aderentes a colagem ao suporte é feita de forma mais ou menos aleatória, garantindo faixas aproximadamente rectangulares. Nestes casos a colagem tanto pode ser realizada a quente como a frio. Pode também ser adoptada uma solução que consiste na aplicação de um material auxiliar, geralmente feltro, de forma a distribuir regularmente as zonas de colagem através das furações circulares que apresenta [LOPES, 1994b].

Quando a ligação ao suporte é realizada de forma independente a impermeabilização pode ser simplesmente aplicada sobre o suporte, devidamente regularizado, ou então pode ser aplicada uma camada de dessolidarização entre ambos.

Para além das três soluções mencionadas existe também a fixação mecânica do revestimento de impermeabilização ao suporte. Pode-se optar por fixações pontuais ou lineares, sendo que a única diferença entre elas é a forma como é transmitido o aperto dos parafusos à impermeabilização fixada [LOPES, 2004].

2.3.5 Classificação quanto à posição da camada de isolamento térmico

A camada de isolamento térmico pode ser colocada em posições distintas numa cobertura em terraço. Os efeitos gerados por essa escolha podem ser variados, condicionando a durabilidade de todo o sistema de impermeabilização assim como o aparecimento de outro tipo de anomalias nos materiais da cobertura. A classificação de acordo com este ponto de vista é definida da seguinte forma:

- coberturas tradicionais;

- coberturas invertidas;
- coberturas com isolamento térmico sob a estrutura resistente.

Coberturas tradicionais

Numa cobertura tradicional a camada de isolamento térmico é colocada como suporte do revestimento de impermeabilização. Desta forma apenas as camadas subjacentes ficam protegidas face às variações dimensionais de origem térmica [ALVES, 2013]. Devido à falta de protecção o revestimento de impermeabilização pode vir a apresentar anomalias ao longo da sua vida útil, pois torna-se mais vulnerável às acções do meio ambiente. Como já foi referido em 2.2.2, o facto de se adoptar uma cobertura deste tipo obriga a cuidados adicionais. Nestes casos é necessária a colocação de uma barreira pára-vapor como suporte do isolamento térmico, de modo a diminuir o risco de ocorrência de condensações internas [HENRIQUES e RATO, 2004].

Coberturas invertidas

A solução de cobertura invertida caracteriza-se pela colocação da camada de isolamento térmico acima do revestimento de impermeabilização. É hoje em dia a solução mais utilizada, pois para além de proteger a impermeabilização a nível térmico, aumentando a sua durabilidade, também permite a sua protecção relativamente a acções mecânicas e diminui de forma significativa a ocorrência de condensações internas. No entanto, neste tipo de cobertura a camada de isolamento pode entrar em contacto com a água e, por esse motivo, deve ser colocado um isolante com porosidade fechada, como é o caso do poliestireno expandido extrudido (XPS).

Coberturas com isolamento térmico sob a estrutura resistente

Dos três tipos de soluções apresentadas é a mais desfavorável. Neste caso a camada de isolamento térmico é colocada sob a estrutura resistente, quer aplicada sobre tecto falso ou então fixada ou projectada directamente na parte inferior da estrutura resistente. Neste tipo de coberturas, para além de ser diminuída a inércia térmica do elemento construtivo, principalmente quando existe uma estrutura resistente em betão armado, também não existe qualquer protecção térmica da estrutura resistente e do sistema de impermeabilização [LOPES, 1994b]. No que diz respeito à ocorrência de condensações internas esta solução deve ser evitada. Como a camada de isolamento térmico é colocada junto ao interior do edifício as temperaturas nos elementos sobrejacentes baixam e, como consequência, há uma redução das pressões de saturação. A probabilidade das pressões parciais cruzarem e ultrapassarem as pressões de saturação é por isso mais elevada, aumentando o risco de aparecimento de condensações no interior da cobertura.

2.3.6 Classificação quanto à pendente

A pendente adoptada para uma cobertura em terraço está de certa forma condicionada pela sua constituição, tipo de impermeabilização e protecção utilizados, e pelo tipo de acessibilidade [LOPES, 2004]. A classificação da cobertura quanto à pendente é feita tendo em conta a facilidade de escoamento da água à superfície, o tipo de protecção a colocar e a necessidade de colocação de fixações mecânicas complementares [NCCt, 1985]. De acordo com as Directivas UEAtc as coberturas podem ser organizadas em quatro classes:

- Classe I - Coberturas em que existe estagnação de água e onde é possível a aplicação de protecção pesada;

- Classe II - Coberturas em que o escoamento da água à superfície é feito de forma satisfatória e onde é permitida a aplicação de protecção pesada;
- Classe III - Coberturas em que a pendente permite um escoamento fácil da água à superfície mas que impede a aplicação de protecção pesada;
- Classe IV - Coberturas em que são necessárias medidas adicionais devido a uma maior pendente, como a utilização de fixações mecânicas complementares.

2.3.7 Classificação quanto à estrutura resistente

A estrutura resistente numa cobertura pode ser classificada como rígida ou flexível, consoante a deformação relativa na perpendicular ao plano da cobertura seja mais ou menos significativa [ROCHA, 2008].

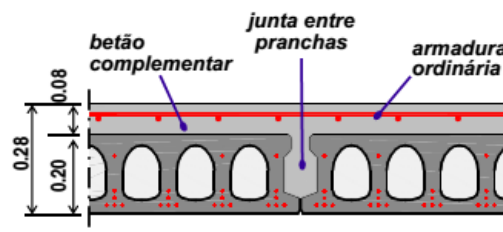
Estrutura resistente rígida

As estruturas rígidas contínuas são executadas sem juntas, não sendo contabilizadas para o efeito as juntas de dilatação previstas em projecto. São exemplo deste tipo de estruturas as lajes maciças (figura 2.6(a)) ou aligeiradas em betão armado e as pré-lajes.

As estruturas rígidas descontínuas apresentam juntas espaçadas regularmente consoante a dimensão do painel. São característicos deste tipo de estruturas as lajes alveoladas (figura 2.6(b)) e alguns perfis prefabricados.



(a) Exemplo de uma estrutura resistente rígida contínua, laje maciça em betão armado.



(b) Exemplo de um estrutura resistente rígida descontínua, laje alveolada.

Fig. 2.6: Exemplos de estruturas resistentes rígidas [RAMOS, 2008].

Estrutura resistente flexível

Uma estrutura resistente flexível é, geralmente, descontínua e constituída por materiais de espessura mais reduzida. Como exemplo mais corrente surgem as chapas metálicas nervuradas (figura 2.7) e as pranchas de madeira.

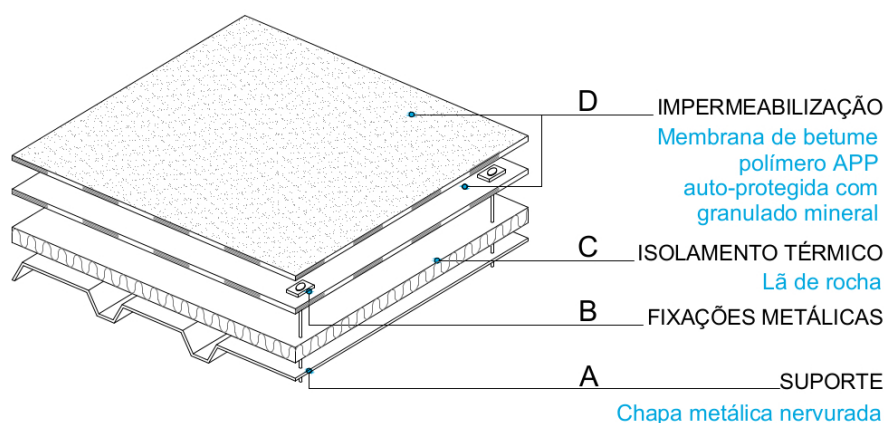


Fig. 2.7: Exemplo de uma estrutura resistente flexível, chapa metálica nervurada [IMPERALUM, sdb].

2.4 Sistemas de impermeabilização não-tradicionais com produtos prefabricados

2.4.1 Generalidades

As membranas de impermeabilização são, hoje em dia, os produtos mais utilizados nos sistemas de impermeabilização de coberturas em terraço. Por esse motivo, e também por serem predominantes nas coberturas em estudo, é de todo o interesse conhecer de forma mais aprofundada as suas principais características.

Estes tipo de produtos prefabricados são organizados, essencialmente, em três categorias distintas: membranas de betume polímero, membranas termoplásticas e membranas elastoméricas [LOPES, 1994b].

2.4.2 Membranas de betume polímero

As membranas de betume polímero são constituídas por uma mistura betuminosa modificada, pela adição de uma resina, que serve de recobrimento a uma ou duas armaduras [GONÇALVES et al., 2005].

Quando é utilizada uma resina plastomérica, polímero de polipropileno atático, a membrana de betume polímero designa-se APP. Ao adicionar-se uma resina elastomérica, polímero de estireno-butadieno-estireno, a membrana de betume modificado passa a ser denominada de SBS [LOPES, 1994b].

No que diz respeito às armaduras constituintes de cada tipo de membrana, APP e SBS, é corrente utilizar-se feltro de poliéster ou fibra de vidro. Estes dois tipos de armaduras podem ser aplicados em conjunto na mesma membrana desde que se trate de uma membrana de armadura dupla. As membranas do tipo APP também podem ser constituídas por armaduras de polietileno de alta densidade apesar de serem menos usuais que as anteriores.

No quadro 2.7 apresentam-se as massas características de cada tipo de armadura e as respectivas resistências à tracção, segundo a direcção longitudinal e transversal.

Como materiais de acabamento, há a possibilidade de colocar em ambas as faces folhas de polietileno ou polipropileno, com aproximadamente $10\mu m$ de espessura, ou então granulado mineral ou folhas de alumínio na face superior, no caso de membranas auto-protégidas.

2.4. Sistemas de impermeabilização não-tradicionais com produtos prefabricados

Quadro 2.7: Características das armaduras aplicadas em membranas de betume polímero, obtidas em ensaios de tracção [LOPES, 1994b].

Tipo de armadura	Massa [g/m ²]	Resistência à tracção (L) [N]	Resistência à tracção (T)[N]	Extensão de rotura [%]
Feltro de poliéster	150 – 250	450 – 800	400 – 700	20 – 50
Fibra de vidro	50	100	50	1 – 3
Folha de polietileno de alta densidade	90	100	170	600

O comportamento destes produtos, sob a acção da temperatura, pode ser avaliado através de três tipos de ensaios: estabilidade dimensional, flexibilidade a baixa temperatura e escorrimento com o calor. Após a análise dos resultados obtidos por Lopes (1994b), é possível concluir que as membranas do tipo APP apresentam melhor desempenho quando sujeitas a altas temperaturas e que, em oposição, as membranas do tipo SBS revelam um melhor comportamento quando expostas a temperaturas mais baixas.

Membranas de betume polímero APP

A mistura utilizada neste tipo de membranas é, essencialmente, constituída por betume de destilação directa, resina plastomérica de polipropileno atáctico, cargas e aditivos diversos [LOPES, 1994b].

As membranas APP apresentam espessuras na ordem dos 4mm, apesar de poderem variar em alguns casos entre 3mm e 5mm. São comercializadas em rolos com 1m de largura e com comprimentos a variar entre os 10m e 20m, de forma a facilitar o manuseamento *in situ*.

Relativamente às características das membranas de betume polímero APP, obtidas em ensaios de tracção, estas são apresentadas de seguida no quadro 2.8.

Quadro 2.8: Características das membranas de betume polímero APP, obtidas em ensaios de tracção [GONÇALVES et al., 2005].

Tipo de polímero	Resistência à tracção (L) [N]	Resistência à tracção (T)[N]
APP	500 – 1200	400 – 950

Membranas de betume polímero SBS

A mistura de betume polímero SBS é composta por betume de destilação directa, resina elastomérica de estireno-butadieno-estireno, cargas minerais e aditivos diversos [FARIA, 2012].

Tal como acontece nas membranas de betume polímero APP, a espessura característica deste tipo de membranas é aproximadamente 4mm. As dimensões de cada rolo variam entre os 10m e os 20m de comprimento e apresentam 1m de largura [LOPES, 1994b].

No quadro seguinte, quadro 2.9, são referidas as características deste tipo de membranas obtidas em ensaios de tracção.

Quadro 2.9: Características das membranas de betume polímero SBS, obtidas em ensaios de tracção [LOPES, 1994b].

Tipo de polímero	Resistência à tracção (L) [N]	Resistência à tracção (T)[N]
SBS	350 – 1100	300 – 1000

Campo de aplicação

As membranas podem ser aplicadas, em superfície corrente, em sistemas aderentes, semi-aderentes e independentes. A escolha do suporte vai depender do tipo de acessibilidade da cobertura, devido ao tipo de solicitações a que estará sujeito, e do método utilizado para aplicação da membrana, de forma a que não existam incompatibilidades entre materiais contíguos [GONÇALVES et al., 2005].

Quando se trata de coberturas acessíveis é aconselhável a aplicação de um sistema com dupla membrana, sendo que uma delas deve ser armada com feltro de poliéster [LOPES, 1994b].

A forma mais comum para a ligação deste tipo de membranas *in situ*, entre si ou ao suporte, é o recurso a soldadura por meio de chama, utilizando-se normalmente maçaricos de gás propano.

Relativamente à largura das juntas de sobreposição, Lopes (1994b) aconselha a que a largura deixada nas juntas transversais seja maior do que a adoptada para as juntas longitudinais. Este facto explica-se por a membrana apresentar um comprimento muito maior segundo a direcção longitudinal, o que leva a que as deformações segundo esse sentido sejam menores em comparação com as obtidas segundo a direcção transversal.

2.4.3 Membranas de PVC plastificado

As membranas de PVC plastificado são obtidas, geralmente, por uma mistura homogeneizada de resina de policloreto de vinilo, plastificantes, estabilizantes, pigmentos e cargas.

Ao contrário das membranas betume polímero este tipo de membranas podem ser armadas ou não, sendo que as armaduras mais frequentes são as de poliéster e as de fibra de vidro [LOPES, 1994b]. No entanto, o facto da membrana ser armada ou possuir um feltro aplicado na face inferior tem algumas vantagens em detrimento das membranas não armadas:

- minimiza as retracções originadas pela perda de plastificantes;
- diminui as variações dimensionais devidas à acção do calor, o coeficiente de dilatação nestes casos é cerca de três vezes menor.

As membranas de PVC, ao entrarem em contacto com betumes e óleos de origem mineral, podem apresentar alguma incompatibilidade, dependendo do tipo de plastificante utilizado [LOPES, 1994b]. Na constituição da maior parte das membranas são utilizados plastificantes monómeros, nestes casos a migração do plastificante é mais intensa e a rotura da membrana ocorre mais rapidamente. De forma a reduzir o efeito de migração referido devem ser utilizados plastificantes com polímeros de elevado peso molecular [GONÇALVES et al., 2005].

A espessura característica deste tipo de membranas encontra-se no intervalo de $1.2mm$ a $1.5mm$. Os rolos são comercializados com comprimentos de $15m$ a $25m$ e larguras a variar entre $1m$ e $2m$ [GONÇALVES et al., 2005].

No quadro 2.10 são referidas as principais características mecânicas das membranas de PVC em função do tipo de armadura aplicada.

Quadro 2.10: Características das membranas de PVC em função do tipo de armadura aplicada obtidas em ensaios de tracção [LOPES, 1994b].

Tipo de armadura	Tensão de rotura (L) [N/mm^2]	Extensão de rotura [%]
Poliéster	15.3 – 20.5	246 – 365
Fibra de vidro	12	210

Quando se sujeita este tipo de materiais a altas temperaturas durante um período de tempo prolongado, 80 °C durante 6 meses, a estabilidade dimensional face ao calor é reduzida [LOPES, 1994b]. Lopes (1994b) refere que após esse condicionamento a membrana sofreu deformações significativas, observando-se contrações na direcção longitudinal e dilatações segundo a direcção transversal.

Campo de aplicação

Os sistemas constituídos por este tipo de membranas são geralmente aplicados de forma independente do suporte ou então fixados mecanicamente, sendo que esta última solução apenas é possível quando existe aplicação de membranas com armaduras de poliéster (com massas de pelo menos 100g/m²) [LOPES, 1994b]. Quando não é prevista a colocação de uma camada de protecção pesada, as membranas de PVC podem ficar à vista [FARIA, 2012].

No que diz respeito à escolha dos suportes, esta deve ser feita de forma a reduzir a perda dos plastificantes existentes na membrana. Para tal, deve ser evitado o contacto directo entre a membrana e os suportes de poliestireno expandido ou poliuretano.

A ligação das juntas de sobreposição, nestes casos, pode ser realizada por soldadura com ar quente ou através de solventes orgânicos. Nos casos em que a ligação é feita através de soldadura com ar quente, a largura da junta efectivamente colada toma valores de aproximadamente 40mm. Quando a ligação é realizada através de solventes orgânicos esse valor é menor, rondando os 30mm [RAPOSO, 2009]. Os sistemas fixados mecanicamente apresentam geralmente larguras de 100mm, aplicando as peças de fixação a uma distância de 30mm do bordo da membrana, de forma a que não haja rasgamento por acção das sucções do vento [LOPES, 1994b].

2.4.4 Membranas de poliolefinas (TPO ou FPO)

As membranas de poliolefinas, ou termoplásticas flexíveis, agrupam-se em dois tipos distintos consoante o tipo de mistura. Num dos casos a mistura que integra a membrana é constituída, na sua maioria, por polipropileno (PP) e um copolímero termoestático ou elastomérico (etileno-propileno-dieno, etileno-propileno-borracha ou polietileno). Relativamente ao segundo tipo de membrana, esta diferencia-se da anterior por ser composta por uma mistura de polietileno (PE) e um copolímero termoestático ou elastomérico (etileno-propileno-dieno, etileno-propileno-borracha ou polipropileno). As misturas, para além dos constituintes principais referidos, também contêm fileres, estabilizantes, retardadores de incêndio, anti-oxidantes e corantes [GONÇALVES et al., 2005].

Estas membranas podem ser armadas ou não. No caso de o serem poderão aplicar-se armaduras em poliéster ou em fibra de vidro. A protecção destes materiais poder ser feita *in situ*, através de pintura, e em alguns casos pode até mesmo não existir [FARIA, 2012].

Para além da grande vantagem de respeitarem o meio ambiente, pois são recicláveis, estas membranas também apresentam maior durabilidade, resultante de uma resistência mais elevada aos raios UV e da compatibilidade com grande parte das substâncias químicas que surgem nas coberturas.

As espessuras mais correntes neste tipo de membranas são de $1.2mm$ a $1.5mm$. A membrana é fornecida em rolos com comprimentos de $20m$ a $25m$ e largura de $2.10m$. Os valores obtidos para a força e extensão de rotura das membranas termoplásticas flexíveis, com armaduras de poliéster, são apresentados no quadro 2.11.

Quadro 2.11: Características das membranas de poliolefinas em função do tipo de armadura aplicada obtidas em ensaios de tracção [GONÇALVES et al., 2005].

Tipo de armadura	Força de rotura (L) [N]	Força de rotura (T) [N]	Extensão de rotura [%]
Poliéster	1280 – 1340	1190 – 1260	25

Outra das vantagens deste tipo de membranas é o seu comportamento face às baixas temperaturas. Quando sujeitas a ambientes deste género apresentam geralmente grande flexibilidade [FARIA, 2012].

Campo de aplicação

Relativamente à aplicação das membranas *in situ*, esta deve ser feita de forma independente do suporte ou então optar-se por fixação mecânica.

As juntas de sobreposição devem ser unidas entre si através de soldadura com ar quente, tal como foi referido para as membranas de PVC no ponto 2.4.3. Nas juntas de sobreposição, nestes casos, a largura deixada deve ser de $50mm$ para sistemas independentes do suporte e de $100mm$ para os casos em que o sistema é fixado mecanicamente [RAPOSO, 2009].

2.4.5 Membranas de EPDM

As membranas de EPDM são fabricadas através de laminagem, calandragem e posterior vulcanização de uma mistura de etileno-propileno-dieno, cargas, agentes de vulcanização e óleos. Em certos casos podem também adicionar-se produtos que melhoram o comportamento destas membranas à acção do fogo, retardadores de fogo. Relativamente ao monómero de etileno-propileno-dieno, este deve encontrar-se na mistura com uma quantidade não inferior a 30% da massa total da mesma [LOPES, 1994b].

No que diz respeito ao tipo de armadura, estas membranas podem apresentar armaduras de poliéster, mais correntes, armaduras de poliamida, também denominadas de nylon, ou então não conterem qualquer tipo de armadura.

Para evitar a aderência entre as faces da membrana, quer durante o enrolamento, quer durante o armazenamento, colocam-se geralmente materiais como o talco ou mica [RAPOSO, 2009].

As espessuras deste tipo de produtos são geralmente muito reduzidas, na ordem de $1.5mm$. Os rolos para aplicação em superfície corrente apresentam larguras e comprimentos variáveis, a largura toma valores entre $1.35m$ e $15.20m$ e o comprimento entre $15m$ e $40m$, aproximadamente [GONÇALVES et al., 2005]. No entanto, nas zonas onde são necessários remates no sistema de impermeabilização, são utilizadas bandas de EPDM ou de policloropreno, comercializadas geralmente em rolos com cerca de $30m$ de comprimento, larguras com dimensões de $0.15m$ a $1.2m$ e espessuras semelhantes às membranas utilizadas em superfície corrente.

Aa tensões de rotura obtidas para as membranas deste tipo, em função do envelhecimento realizado, são apresentadas no quadro 2.12.

Quadro 2.12: Tensão de rotura das membranas de EPDM em função do tipo de envelhecimento obtidas em ensaios de tracção [LOPES, 1994b].

Tipo de envelhecimento	Tensão de rotura [N/mm^2]	Tensão de rotura (L) [N/mm^2]	Tensão de rotura (T) [N/mm^2]
Nenhum (membrana nova)	7.8 – 12.8	8.1 – 12.8	
Calor (84 dias a 80 °C)	9.6 – 10.5	9.5 – 10	
Raios UV (1000 horas)	8.8 – 11.1	9.1 – 9.4	

O alongamento na rotura é aproximadamente o mesmo segundo as direcções longitudinal e transversal, tomando valores entre 382% e 510% para a membrana sem qualquer tipo de envelhecimento. Depois de envelhecida, a membrana chega a atingir reduções no alongamento de 46.5%, no caso de envelhecimento ao calor (84 dias a 80 °C), e de 8.9% quando envelhecida através de raios UV (1000 horas) [LOPES, 1994b].

A resistência ao rasgamento para uma membrana nova varia entre 10.8N/mm e os 11.7N/mm, para a direcção longitudinal, e entre 11.4N/mm e os 13.1N/mm segundo o sentido transversal. Quando envelhecida pelo calor a membrana chega a reduzir a sua resistência em cerca de 66.7%.

Relativamente à estabilidade dimensional da membrana face ao calor, é segundo a direcção longitudinal, direcção de fabrico, que as deformações ocorrem com maior intensidade.

Campo de aplicação

Os sistemas de impermeabilização com membranas deste tipo podem ser aplicados de forma aderente, independente do suporte ou fixados mecanicamente. Em qualquer um dos casos as membranas, após o desenrolamento, devem ficar em repouso durante um período de pelo menos 30 minutos. Desta forma, as deformações geradas pelo armazenamento desaparecem e a membrana ajusta-se à superfície do suporte. Em relação às pendentes, só é aconselhada a aplicação destas membranas com inclinações não inferiores a 1.5%.

A escolha do tipo de suporte irá depender da solução escolhida para aplicar o revestimento de impermeabilização. Quando se optar pela colocação do revestimento de forma aderente, em que o suporte seja constituído por poliestireno ou perlite expandidos, deve prever-se a aplicação de um feltro de poliéster com 150g/m², uma vez que estes materiais são incompatíveis com os solventes contidos na cola utilizada. O feltro de poliéster, atrás referido, também deve ser aplicado quando houver possibilidade da membrana entrar em contacto com produtos betuminosos ou óleos [LOPES, 1994b].

A ligação das membranas entre si e ao suporte pode ser efectuada com diversos produtos, tais como as colas de contacto, colas termo-fusíveis, colas aquosas, produtos autocolantes e bandas adesivas. As colas de contacto, entre os produtos referidos, são as que mais se utilizam. Esta tendência deve-se ao baixo custo, à facilidade de aplicação e à sua secagem rápida.

Quando a ligação é realizada através de colas, a largura das juntas de sobreposição varia, geralmente, entre os 75mm e os 150mm. Ao optar-se pela aplicação de bandas adesivas, a largura das juntas deve ser superior ao mencionado anteriormente, atingindo valores de 175mm [LOPES, 1994b]. Independentemente do tipo de ligação adoptado, a zona da membrana que fica sobreposta deve ser rematada com um mastique com base em etileno-propileno-dieno [RAPOSO, 2009].

2.4.6 Membranas de borracha butílica

De todas as membranas elastoméricas, as membranas de borracha butílica são as mais utilizadas em Portugal. São obtidas por copolimerização de isobutileno por acção de isopreno que, apesar de facilitar a vulcanização, é aplicado em quantidades muito reduzidas na mistura (1% a 2%). Estão também presentes na mistura outros constituintes, como é o caso do monómero de etileno-propileno-dieno (EPDM), negro de fumo e aceleradores de vulcanização [LOPES, 1994b].

Este tipo de membranas são, geralmente, não armadas. Quando existe aplicação de armadura há uma melhoria da estabilidade dimensional da membrana, assim como um aumento da sua resistência mecânica [FARIA, 2012].

Existem alguns produtos que não devem entrar em contacto com as membranas de borracha butílica, por provocarem perdas significativas nas suas características. Entre esses produtos são destacados a gasolina e os solventes aromáticos [LOPES, 1994b].

As espessuras mais utilizadas nestes produtos são de 1.5mm e 2mm, apesar de existirem espessuras mais reduzidas no mercado que se utilizam para outros fins, como por exemplo barreiras pára-vapor. Os rolos são comercializados com 15m de largura e 60m de comprimento [RAPOSO, 2009].

Relativamente ao comportamento destas membranas à tracção, os valores da tensão de rotura variam entre 6.7MPa e 9MPa, enquanto que o alongamento na rotura chega a atingir valores entre 400% e 814% [GONÇALVES et al., 2005].

Segundo Lopes (1994b) os valores conhecidos para a estabilidade dimensional destas membranas face ao calor tomam valores entre -0.89% e -0.29%.

Campo de aplicação

Para os revestimentos constituídos com este tipo de membranas podem adoptar-se várias soluções de aplicação *in situ*. No leque de soluções de aplicação possíveis estão incluídos os sistemas aderentes, semi-aderentes, independentes ou fixados mecanicamente. Para qualquer um dos sistemas referidos a impermeabilização é colocada em camada única. Quanto ao tipo de suporte, não existem quaisquer restrições no que diz respeito a incompatibilidades com este tipo de membranas.

Para ligação das juntas de sobreposição podem utilizar-se dois tipos de produtos distintos, como as colas e as bandas adesivas. Existe também a possibilidade de ligar estas membranas em fábrica, onde se obtêm peças com largura duplicada face às dimensões iniciais.

Quando se pretende ligar as membranas ao suporte utilizam-se, geralmente, colas com aplicação a frio ou a quente. Para aplicação a frio empregam-se emulsões com base em resinas acrílicas e para aplicação a quente dispersões de borracha em betume [LOPES, 1994b].

2.4.7 Membranas de poli-isobutileno (PIB)

Para obter este tipo de membranas é necessário homogeneizar todos os constituintes da mistura e, posteriormente, realizar a extrusão. Ao contrário das membranas de EPDM e de borracha butílica, referidas em 2.4.5 e 2.4.6, respectivamente, estas membranas não são vulcanizadas. A mistura que permite obter este tipo de produtos é constituída na sua maioria por poli-isobutileno e por quantidades mais reduzidas de cargas minerais e aditivos (tais como negro de fumo). Após extrusão a membrana fica com tonalidade escura e com massa volúmica de 1.6g/cm³ [LOPES, 1994b].

A maioria das membranas não são armadas. Nos casos em que apresentam armaduras estas são de poliéster e são colocadas junto à face inferior através de colagem.

De forma a evitar perda de características da membrana de poli-isobutileno, deve evitar-se o contacto entre estas e produtos quimicamente agressivos, como as pinturas com base em solventes, óleos, petróleo ou parafina.

Estas membranas apresentam espessuras entre 1.5mm e 2.5mm, largas de 1.05m a 1.30m e comprimentos de 10m ou 15m. Em zonas de remates na impermeabilização as larguras apresentam valores mais reduzidos, variando entre 0.35m e 0.65m [GONÇALVES et al., 2005].

As características das membranas de poli-isobutileno obtidas em ensaios de tracção são apresentadas no quadro 2.13.

Quadro 2.13: Características das membranas de poli-isobutileno obtidas em ensaios de tracção [LOPES, 1994b].

Tensão de rotura (L) [N/mm ²]	Tensão de rotura (T) [N/mm ²]	Extensão de rotura (L) [%]	Extensão de rotura (T) [%]
3.5 – 4.5	3.2 – 4.3	400 – 520	580 – 599

Relativamente à estabilidade dimensional, as variações devidas à acção da temperatura são sempre inferiores a 1%, tanto na direcção longitudinal como na transversal.

Campo de aplicação

A aplicação das membranas de poli-isobutileno é restrita a coberturas de acessibilidade limitada para trabalhos de reparação e manutenção. Estes tipos de impermeabilizações, em coberturas planas, podem ser aplicados em sistemas aderentes, semi-aderentes ou de forma independente do suporte. Nos sistemas aderentes e semi-aderentes não existe a necessidade de colocar qualquer tipo de protecção, seja ela pesada ou leve. Como protecção leve, quando seja necessária, existe a possibilidade de aplicar pinturas da mesma natureza das membranas, que para além da função estética podem contribuir em termos da reflectância, ao apresentarem cores claras [LOPES, 1994b].

Para ligação das membranas entre si podem utilizar-se tanto bandas autocolantes como colas. Quando o objectivo é a ligação da membrana ao suporte, podem-se também utilizar colas, apesar de terem características diferentes das anteriores, e betumes insuflados a quente. A escolha do produto de colagem, neste último caso, vai depender da natureza do suporte e da pendente da cobertura. Os remates com elementos emergentes são realizados sempre com aderência total, por colagem de membranas ou por aplicação de bandas da mesma natureza [LOPES, 1994b].

2.4.8 Membranas de polietileno clorado (CPE)

A membranas de polietileno clorado são constituídas por uma mistura de polietileno de alta densidade, clorado previamente, e aditivos diversos, como estabilizantes e anti-oxidantes.

As membranas podem ser armadas ou não. Ao integrar armadura na membrana, esta é colocada geralmente entre duas folhas de reduzida espessura, durante o processo de laminagem, utilizado-se feltro de poliéster não tecido para o efeito. Quando o suporte não for regular ou apresentar alguma aspereza a membrana também deve ser protegida com feltro de poliéster na face inferior [GONÇALVES et al., 2005].

Tanto os preservadores de madeira, com base em hidrocarbonetos, como o PVC plastificado são incompatíveis quimicamente com as membranas de polietileno clorado. Deste modo, o contacto entre estes materiais deve ser evitado, e assim evitar a perda de características do revestimento de impermeabilização [LOPES, 1994b].

As espessuras comercializadas podem tomar valores de $1.2mm$ ou $1.8mm$. Os rolos apresentam comprimentos e larguras variáveis, normalmente de $15m$ a $25m$ e de $1m$ a $2.05m$, respectivamente.

Após terem sido realizados ensaios de tracção, para membranas novas e sujeitas a envelhecimento (calor, raios UV e SO_2), Lopes (1994b) refere que os valores mais baixos de resistência à tracção e módulo de elasticidade se verificam segundo a direcção transversal. O alongamento na rotura apresentou resultados opostos às características anteriormente referidas, obtendo-se valores menores segundo o sentido longitudinal.

Relativamente ao comportamento destas membranas ao frio, começam a surgir fissurações quando sujeitas a temperaturas inferiores a $-25^\circ C$ [LOPES, 1994b].

Campo de aplicação

Para aplicação destes revestimentos de impermeabilização deve utilizar-se fixação mecânica. No caso das juntas de sobreposição, estas podem ser ligadas por soldadura a ar quente ou utilizando produtos com base em solventes. Quando a ligação for realizada por meio de ar quente, há que ter cuidados especiais relativamente ao suporte, principalmente se for poliestireno expandido. Tanto na soldadura a ar quente como na ligação com solventes, a largura efectivamente colada nas juntas de sobreposição varia entre $40mm$ e $50mm$.

Capítulo 3

Anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço

3.1 Generalidades

Para se obter uma cobertura em terraço com o comportamento adequado devem ser respeitadas todas as etapas de construção, desde o projecto até à manutenção da cobertura. Grande parte das anomalias, cerca de 80%, poderiam ser evitadas se existisse uma melhoria na definição das soluções a adoptar e uma preparação rigorosa da mão-de-obra, o que não acontece geralmente [SILVA e GONÇALVES, 2001].

A existência de anomalias na cobertura origina, geralmente, a perda de estanquidade do revestimento de impermeabilização e, como consequência, a infiltração de água para as camadas subjacentes. Em Portugal essas manifestações de humidade ocorrem, normalmente, num período de 1 a 2 anos após a construção [LOPES, 1994a].

A classificação das anomalias ao longo deste capítulo será feita de acordo com critério utilizado por Lopes (1994a), diferenciando as anomalias que ocorrem em superfície corrente das que ocorrem em pontos singulares da cobertura.

3.2 Anomalias em superfície corrente da cobertura

3.2.1 Fissuração do revestimento de impermeabilização

Este tipo de anomalia resulta, geralmente, de acções transmitidas pelas camadas contíguas ao revestimento de impermeabilização [LOPES, 1994a].

A carência de uma camada de dessolidarização, entre a protecção pesada rígida e a impermeabilização (figura 3.1), assim como a inexistência de juntas de esquadramento na camada de protecção são erros de projecto frequentes que levam a este tipo de anomalia. A camada de protecção ao movimentar-se, por retracção ou por variações dimensionais devidas à temperatura, transmite as acções originadas directamente à membrana de impermeabilização levando, como consequência, à ocorrência de fissuração pelo facto de ser ultrapassada a capacidade de deformação da membrana.



Fig. 3.1: Inexistência de camada de dessolidarização entre a betonilha e o revestimento de impermeabilização [SILVA e GONÇALVES, 2001].

Em coberturas onde se opta por uma protecção pesada a granel também pode surgir fissuração na impermeabilização. Neste caso, o deslocamento destes materiais, por acção do vento, faz com que a membrana fique exposta à radiação solar e perca ductilidade originando, posteriormente, fissuração da mesma.

A escolha de uma protecção leve, entre as soluções mencionadas para camada de protecção, é aquela que apresenta menor eficácia face à acção dos agentes atmosféricos. Tanto o vento como o escoamento da água na superfície da cobertura (e por vezes o acesso de pessoas) levam a que o granulado mineral se dessolidarize da membrana betuminosa, passando a existir partes da membrana que ficam expostas directamente à radiação solar (figura 3.2). O envelhecimento torna-se assim mais acelerado e, como consequência, a fissuração começa a surgir mais rapidamente [LOPES, 1994a].

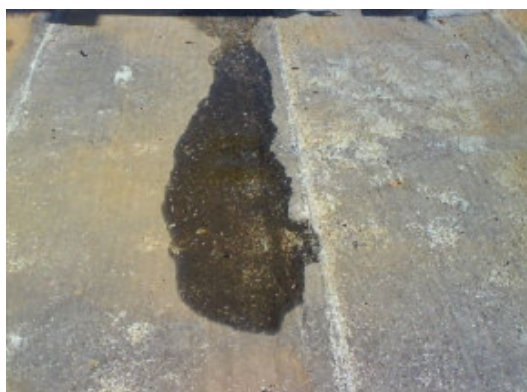


Fig. 3.2: Dessolidarização do granulado mineral em algumas zonas da membrana betuminosa [RAPOSO, 2009].

Quando existe incompatibilidade química entre o revestimento de impermeabilização e o seu suporte também estão reunidas as condições para o aparecimento deste tipo de anomalia. Um exemplo frequente é a migração dos plastificantes contidos nas membranas de PVC, tornando-as menos dúcteis, quando estas entram em contacto com poliestireno expandido ou poliuretano, como se referiu em 2.4.3.

O tipo de ligação entre a impermeabilização e o suporte pode também ser uma das causas do aparecimento de fissuração na superfície da membrana. As anomalias surgem, normalmente, devido a deformações do suporte, no plano do revestimento de impermeabilização ou na perpendicular a este. As deformações no plano da impermeabilização devem-se, geralmente, a retracções por secagem, quando os

suportes são constituídos por argamassas ou betões, e a variações dimensionais, originadas pela acção da temperatura ou da humidade nos materiais do suporte. As deformações que ocorrem na perpendicular do revestimento de impermeabilização devem-se, por sua vez, a suportes muito deformáveis, como por exemplo as placas de isolante térmico. Nestes casos a deformação é originada por encurvadura das placas, que ocorre devido ao diferencial de temperatura entre a face superior e a face inferior do isolante [LOPES, 1994a]. Num sistema aplicado de forma aderente essas deformações são transmitidas mais facilmente à impermeabilização, o que torna esta solução mais desfavorável em termos de aparecimento de fissuras à superfície da membrana.

3.2.2 Perfuração do revestimento de impermeabilização

A perfuração do revestimento de impermeabilização ocorre, geralmente, por punçoamento estático (figura 3.3), de longa duração, ou por punçoamento dinâmico, de curta duração. As cargas pontuais de natureza estática resultam, essencialmente, da colocação de suportes ou de equipamentos sobre o revestimento de impermeabilização, como por exemplo sistemas de AVAC, suportes de depósitos de água, estendais, antenas, etc. [LOPES, 1994a].



Fig. 3.3: Perfuração do revestimento de impermeabilização por punçoamento estático [MACHADO, 2009].

O punçoamento dinâmico, por sua vez, tem origem em cargas pontuais originadas pela queda de objectos diversos, durante a construção ou em intervenções posteriores.

Quando o revestimento de impermeabilização é fixado mecanicamente também pode ocorrer perfuração mas, neste caso, por acção das respectivas peças de fixação. A referida situação ocorre quando o suporte da impermeabilização apresenta compressibilidade elevada. Como as peças de fixação não acompanham a deformação do suporte, quando sujeito a cargas originadas pela circulação de pessoas ou pela colocação de equipamentos, estas exercem acções na impermeabilização no sentido contrário, ou seja de baixo para cima, e provocam perfuração da membrana [LOPES, 1994a].

3.2.3 Arrastamento da protecção pesada com elementos soltos

O arrastamento da protecção pesada com elementos soltos, pela acção do vento, pode ser provocado devido à adopção de uma espessura insuficiente da respectiva camada ou então pela aplicação de materiais com granulometria reduzida.

Este tipo de anomalia começa a surgir, inicialmente, em zonas periféricas da cobertura, locais onde o vento actua com maior intensidade [LOPES, 1994a].

3.2.4 Arrancamento do revestimento de impermeabilização

O arrancamento do sistema de impermeabilização pode ser originado pelo arrastamento da protecção pesada, quando constituída por elementos soltos, ou pela deficiente ligação ao suporte, no caso de se tratar de uma membrana auto-protegida.

Numa cobertura com protecção pesada a granel os sistemas são aplicados, na sua maioria, de forma independente do suporte. Como o arrastamento dos elementos soltos leva à ausência de protecção sobre a impermeabilização, pode ocorrer arrancamento do sistema [LOPES, 1994a].

Em sistemas aderentes ou semi-aderentes constituídos por membranas auto-protegidas, a resistência do revestimento à acção do vento vai depender, essencialmente:

- da adequabilidade do produto de colagem e da quantidade aplicada, quando é usada cola ou betume quente;
- da técnica e experiência da mão-de-obra, quando é utilizada soldadura por meio de chama.

Quando se realiza a fixação mecânica, o arrancamento do revestimento de impermeabilização é originado, geralmente, por um número insuficiente das peças de fixação e pela deficiente amarração à estrutura resistente [LOPES, 1994a].

A figura 3.4 mostra a deformação sofrida numa membrana fixada mecanicamente quando sujeita à acção do vento.

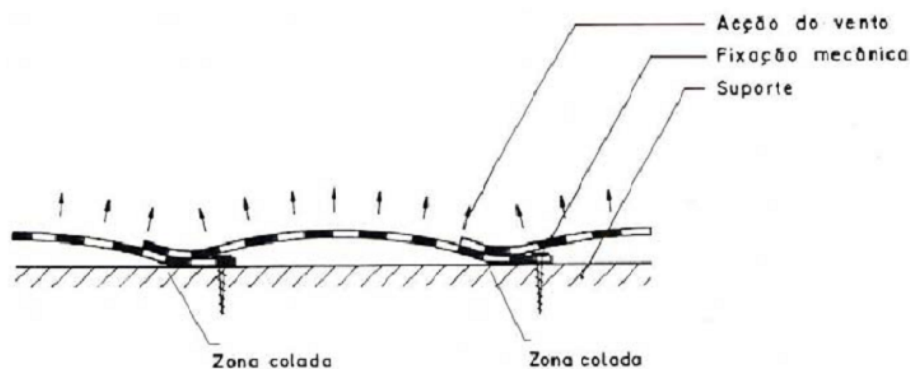


Fig. 3.4: Efeito da acção do vento num revestimento de impermeabilização com fixação mecânica [LOPES, 1994a].

3.2.5 Permanência prolongada da água na cobertura

A permanência prolongada da água numa cobertura pode resultar:

- da reduzida pendente dessa mesma cobertura;
- da deficiente conformação da camada de forma (figura 3.5);
- de obstruções de caleiras ou de embocaduras dos tubos de queda;
- da deformação do suporte em zonas localizadas, quando este é muito compressível.



Fig. 3.5: Acumulação de água na cobertura devido à deficiente conformação da camada de forma [HARRISON, 1996].

Esta anomalia pode originar, com maior ou menor intensidade, outro tipo de anomalias, dependendo:

- da natureza das armaduras que constituem o revestimento de impermeabilização; as armaduras orgânicas são mais sensíveis à acção da água;
- da quantidade de material que recobre essas mesmas armaduras;
- do tipo de acabamento da membrana;
- da proximidade de elementos vegetais.

A permanência de água propicia a acumulação de poeiras e sementes, com conseqüente desenvolvimento vegetal e cujas raízes podem provocar danos nos sistemas de impermeabilização [FARIA, 2012] (ver ponto 3.2.8).

Em revestimentos de impermeabilização não tradicionais a permanência da água durante longos períodos de tempo leva, geralmente, a uma redução da capacidade resistente (até cerca de um quarto da resistência inicial) e a uma diminuição da deformabilidade [LOPES, 1994a].

3.2.6 Formação de pregas

A formação de pregas é originada pela deformação do revestimento de impermeabilização quando sujeito à acção do calor (figura 3.6).



Fig. 3.6: Formação de pregas no revestimento de impermeabilização [WALTER, 2002].

Este tipo de anomalia pode surgir devido ao comportamento viscoso da impermeabilização face ao suporte e, de forma mais notória, devido aos diferentes materiais que constituem o revestimento de impermeabilização, principalmente quando os coeficientes de dilatação térmica destes são muito díspares [LOPES, 1994a]. No primeiro caso a formação de pregas ocorre, basicamente, pelo facto da impermeabilização não acompanhar a velocidade de deformação das juntas e fissuras do suporte, tanto durante a abertura como no fecho das mesmas. As membranas auto-protegidas com alumínio são, por sua vez, um exemplo da segunda situação referida. Como o betume excede a capacidade de deformação elástica durante a dilatação do alumínio, quando este volta à sua posição inicial fica com uma deformação residual, originando pregas à superfície da membrana.

3.2.7 Descolamento das juntas de sobreposição

O descolamento das juntas de sobreposição (figura 3.7) é originado principalmente pela acção do vento, pela deficiente aplicação *in situ* ou então causado por erros de concepção, durante a fase de projecto [RAPOSO, 2009].



Fig. 3.7: Descolamento da junta de sobreposição num revestimento de impermeabilização [HARRISON, 1996].

A acção do vento pode originar anomalias deste tipo quando:

- remove a protecção pesada com elementos soltos em determinadas zonas da cobertura, deixando a impermeabilização directamente exposta;
- o número de peças de fixação na junta é insuficiente; neste caso a capacidade resistente da junta de sobreposição é excedida e origina-se descolamento por pelagem (figura 3.8).

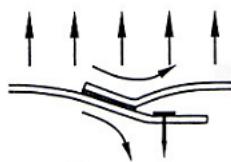


Fig. 3.8: Descolamento das juntas de sobreposição devido às forças de pelagem originadas pelo vento [GONÇALVES et al., 2005].

A deficiente aplicação *in situ* também pode contribuir para o aparecimento deste tipo de anomalias, como já foi referido. Como causas principais podem mencionar-se a aplicação insuficiente do produto de colagem ou a aplicação de uma técnica de soldadura incorrecta. Quando é fornecido calor em demasia ao

revestimento de impermeabilização, durante a soldadura, a membrana e as respectivas armaduras perdem as suas capacidades resistentes e de deformação, facilitando o descolamento das juntas. As membranas mais afectadas por este tipo de anomalia são as que apresentam armaduras de polietileno, por serem mais sensíveis ao calor [LOPES, 1994a].

O erro de concepção mais frequente, que resulta em anomalias deste género, é a adopção de uma largura insuficiente nas juntas de sobreposição.

3.2.8 Desenvolvimento de vegetação

Este tipo de anomalia resulta essencialmente da falta de manutenção da cobertura e da deficiente evacuação das águas pluviais.

A vegetação é facilmente identificável e costuma surgir na maioria dos casos em locais com pouca insolação, com acumulação de detritos, ou onde há permanência prolongada de água [RAPOSO, 2009, ROCHA, 2008]. A permanência de vegetação no revestimento de impermeabilização (figura 3.9) pode levar à sua degradação, por acção das raízes da própria planta. Este tipo de anomalia pode ser evitada se forem aplicadas membranas com aditivos anti-raízes. No entanto, não se conhece a durabilidade destes aditivo, pelo que o mais eficaz é evitar a acumulação de água na cobertura.



Fig. 3.9: Desenvolvimento de vegetação na junta de sobreposição da membrana [WALTER, 2002].

3.2.9 Empolamentos

Os empolamentos são sobreelevações na impermeabilização, resultantes da presença de ar ou de água sob pressão, entre membranas de um sistema ou entre uma das camadas e o suporte [LOPES, 1994a].

Nos locais onde surgem este tipo de anomalias o revestimento de impermeabilização fica mais fragilizado, ocorrendo por vezes perfuração ou rotura quando fica sujeito a pressões exteriores.

As causas principais destas anomalias são:

- inexistência de colagem em zonas localizadas nas camadas do sistema;
- utilização de membranas de rolos achatados, devido ao mau armazenamento;
- existência de materiais estranhos entre o revestimento de impermeabilização e o suporte;
- falta de planeza ou curvatura excessiva do suporte;

- ocorrência de condensações internas.

Como os revestimentos de impermeabilização apresentam, geralmente, resistências à difusão elevadas, o vapor de água resultante das condensações internas não consegue atravessar a membrana. Dessa forma, a tensão exercida pelo vapor de água na impermeabilização ultrapassa a tensão de aderência do produto de colagem e geram-se empolamentos.

3.3 Anomalias em pontos singulares da cobertura

3.3.1 Anomalias em remates com elementos emergentes

Descolamento de remates

O descolamento do revestimento de impermeabilização nas zonas de remate pode ser originado por diversos factores, entre os quais [LOPES, 1994a]:

- irregularidade do suporte;
- teor em água excessivo do suporte;
- incorrecta execução dos remates devido às dificuldades de acesso;
- ausência de disposições construtivas de protecção no bordo superior do remate; para evitar o descolamento devem colocar-se peças adicionais como rufos metálicos (figura 3.10(a) e 3.11) ou introduzir o remate no elemento emergente (figura 3.10(b));
- deficientes condições de colagem, geralmente, por aplicação de quantidade insuficiente de produto;
- aplicação em condições atmosféricas desfavoráveis;
- mão-de-obra pouco qualificada;
- aplicação sobre suportes muito deformáveis;
- remates mal executados; o revestimento de impermeabilização não deve ser só inserido na espessura do reboco (figura 3.12);
- altura insuficiente dos remates.



(a) Aplicação de rufo metálico num remate com elemento emergente. (b) Introdução do remate na parede de alvenaria elemento emergente.

Fig. 3.10: Exemplos de remates com elementos emergentes [FIGUEIREDO, 2012].

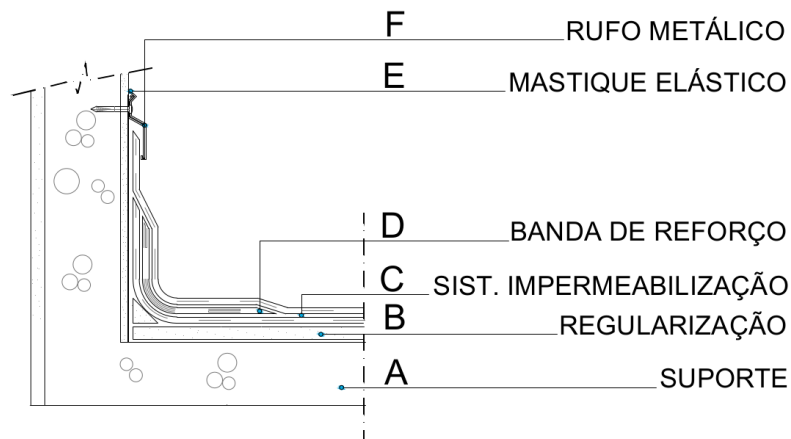


Fig. 3.11: Correcta execução de um remate com elemento emergente utilizando rufo metálico - sistema de camada dupla em zona corrente [IMPERALUM, sda].

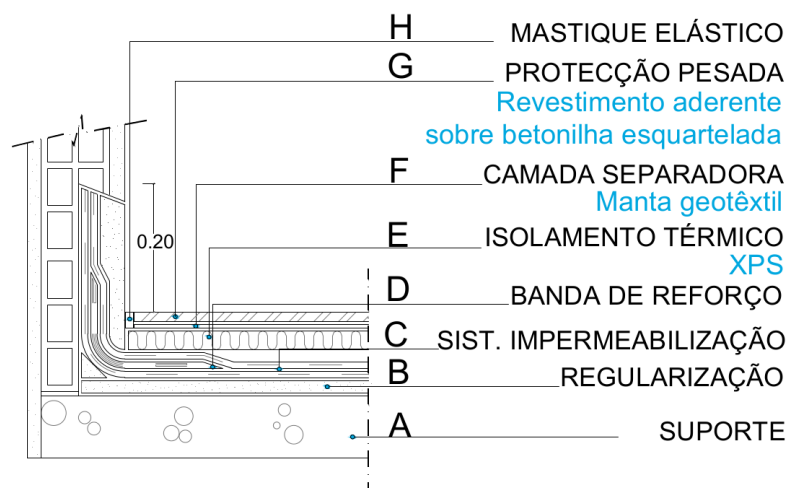


Fig. 3.12: Correcta execução de um remate com elemento emergente através da introdução desse remate na alvenaria. Inserção do remate na espessura da parede sem estar proporcional à espessura da parede - sistema de camada dupla em zona corrente [IMPERALUM, sda].

Fluência ou deslizamento dos remates

A fluência ou deslizamento do remate ocorre, geralmente, quando o revestimento de impermeabilização é de base betuminosa, devido à acção do calor.

Uma das principais causas desta anomalia é a não aplicação de fixação mecânica, quando o remate é demasiado extenso em altura [LOPES, 1994a].

Altura insuficiente dos remates

A altura do remate do revestimento de impermeabilização deve ser a necessária para que não existam infiltrações de água nesses locais, sendo que o valor adoptado para a generalidade dos revestimentos de impermeabilização é de $0.15m$ [LOPES, 1994a]. Para valores inferiores a execução dos remates

torna-se bastante difícil e podem começar a surgir zonas menos aderentes que resultam, mais tarde, em descolamentos ou deslizamentos da impermeabilização.

Nas zonas de soleira de portas, como estas não ficam muito sobrelevadas face à cota da superfície corrente da cobertura, o remate deve ser prolongado sob a soleira como se verifica na figura 3.13.

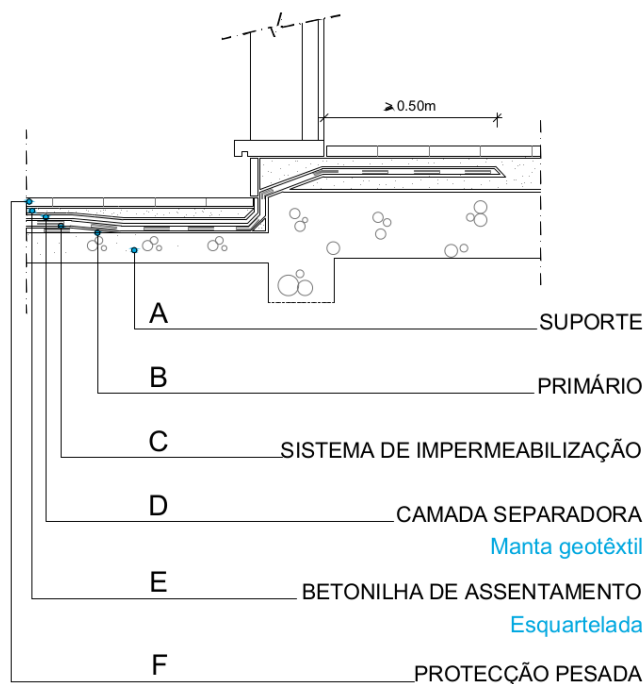


Fig. 3.13: Correcta execução de um remate sob soleira de uma porta [IMPERALUM, sda].

Fissuração de remates

A fissuração do revestimento de impermeabilização surge, por vezes, devido a movimentos diferenciais de origem térmica da protecção pesada rígida. Quando não se prevê a aplicação de uma junta na camada de protecção (figura 3.14), ao longo de todo o elemento emergente, a capacidade resistente da impermeabilização a esforços de corte é excedida, devido aos movimentos diferenciais, e ocorre fissuração ao longo do remate [RAPOSO, 2009].

A inexistência de uma protecção vertical armada, ou a sua interrupção acima da superfície aparente da protecção pesada, é outra das causas deste tipo de anomalia. Se a protecção referida for aplicada deve apresentar juntas com espaçamento de $2m$ entre si [LOPES, 1994a].

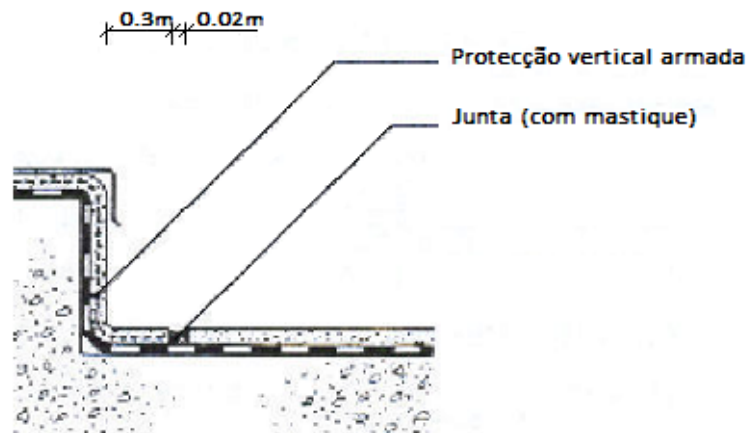


Fig. 3.14: Disposições construtivas a considerar quando é aplicada uma camada de protecção rígida num remate com elemento emergente [LOPES, 1994a].

Os movimentos diferenciais acentuados, entre a estrutura resistente e o elemento emergente, quando este é constituído por alvenaria de tijolo ou blocos de betão, também podem originar fissuração do revestimento de impermeabilização.

Nas platibandas que são compostas por elementos prefabricados devem ser colocadas bandas de dessolidarização nas juntas entre painéis, de forma a diminuir as tensões que se instalam no remate. As tensões devem-se, geralmente, a deslocamentos de origem térmica entre as peças prefabricadas [LOPES, 1994a].

Deficiências ao nível do capeamento da platibanda

O capeamento da platibanda, quando é mal executado ou mal conservado, permite a infiltração da água da chuva e origina a degradação do revestimento de impermeabilização.

Para garantir um comportamento adequado da solução construtiva deve-se:

- colocar um capeamento com material adequado e com pingadeira;
- adoptar uma pendente para o interior da cobertura em terraço.

3.3.2 Anomalias em juntas de dilatação

As anomalias mais frequentes em zonas de juntas de dilatação são:

- descolamento das juntas de sobreposição;
- fissuração dos remates;
- enrugamento dos remates.

Estas anomalias são originadas, essencialmente, por erros de concepção pois na maioria dos casos, a junta de dilatação não é considerada como um elemento descontínuo. Como não existe descontinuidade entre as camadas, o revestimento de impermeabilização não acompanha os movimentos diferenciais da junta e a sua capacidade de deformação é excedida, ocorrendo fissuração.

Para reduzir o risco de aparecimento de anomalias nestes locais deve-se optar por disposições construtivas como as apresentadas nas figuras 3.15 e 3.16 para sistemas de impermeabilização de camada dupla em zona corrente, que dizem respeito, respectivamente, a um remate da junta de dilatação ao nível da superfície corrente da cobertura e a um remate sobrelevado.

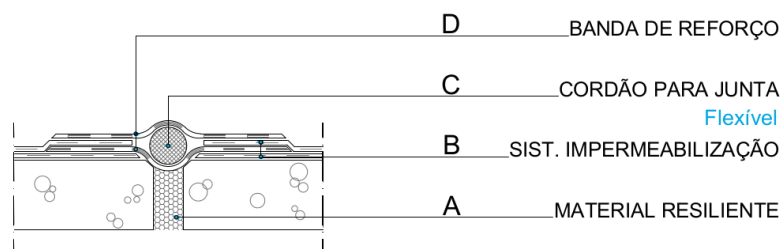


Fig. 3.15: Correcta execução de um remate em zona de junta de dilatação ao nível da superfície corrente da cobertura [IMPERALUM, sda].

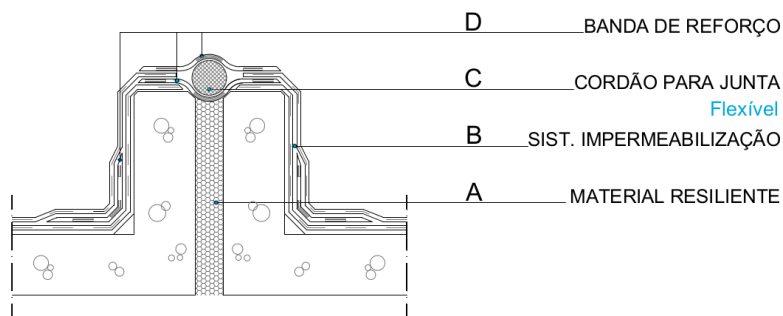


Fig. 3.16: Correcta execução de um remate sobrelevado em zona de junta de dilatação [IMPERALUM, sda].

3.3.3 Anomalias em zonas de escoamento de águas pluviais

Anomalias junto a tubos de queda

As anomalias junto aos tubos de queda devem-se essencialmente a erros de concepção, à má execução e a obstruções, que impedem o escoamento eficiente das águas pluviais.

Os erros de concepção e execução na zona das embocaduras originam, geralmente, infiltrações de água para as camadas subjacentes, como é visível na figura 3.17.



Fig. 3.17: Infiltrações de água junto a embocaduras dos tubos de queda [ANTÓNIO, 2011].

Relativamente à obstrução dos tubos de queda, esta pode ser evitada se existir a colocação de ralos (de pinha ou de outros) na embocadura dos tubos, se durante a fase de projecto houver um correcto dimensionamento da secção do tubo e se passar a ser efectuada uma manutenção periódica da cobertura (figura 3.18).

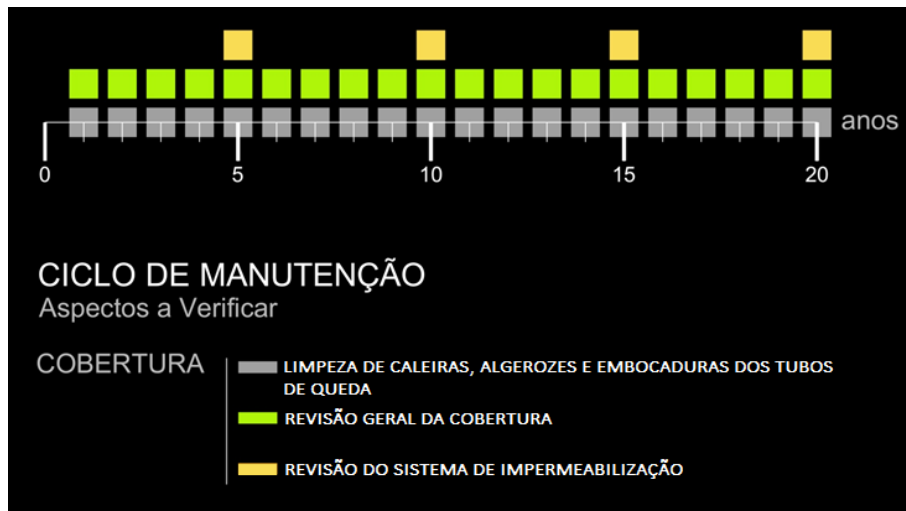


Fig. 3.18: Plano de manutenção de uma cobertura [AMADO, 2013].

Os remates nas zonas de embocadura devem ser executados como se exemplifica na figura 3.19. No remate deve ser sempre colocada uma peça de ligação ao tubo de queda, sendo o aro da peça intercalado entre o sistema de impermeabilização e o canhão colocado pelo interior do tubo de queda numa extensão considerada adequada, com ranhuras que impeçam o refluxo.

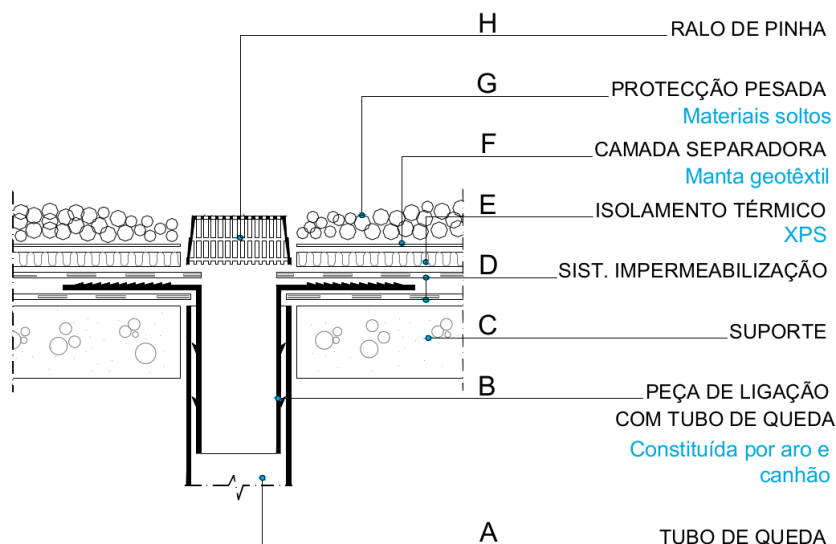


Fig. 3.19: Correcta execução de um remate com embocadura de um tubo de queda [IMPERALUM, sda].

Anomalias em caleiras

O descolamento das juntas de sobreposição e a fissuração são as principais anomalias que surgem no revestimento de impermeabilização das caleiras [LOPES, 1994a].

São várias as causas que contribuem para o descolamento das juntas de sobreposição, mencionando-se de seguida as mais relevantes:

- reduzida largura das juntas;
- sentido de aplicação das membranas inadequado (figura 3.20);
- reduzida pendente da cobertura;
- produtos de colagem inadequados;
- deficiente aplicação do produto de colagem.



Fig. 3.20: Sentido a adoptar para a aplicação da membrana em zona de caleira [LOPES, 1994a].

A fissuração, por sua vez, pode ocorrer devido a um envelhecimento prematuro do revestimento de impermeabilização ou a disposições construtivas insatisfatórias. Na figura 3.21 mostra-se um remate bem executado em zona de caleira. No entanto, verifica-se que a protecção do revestimento de impermeabilização nessa zona é inexistente ou fraca (se a membrana exterior apresentar protecção leve).

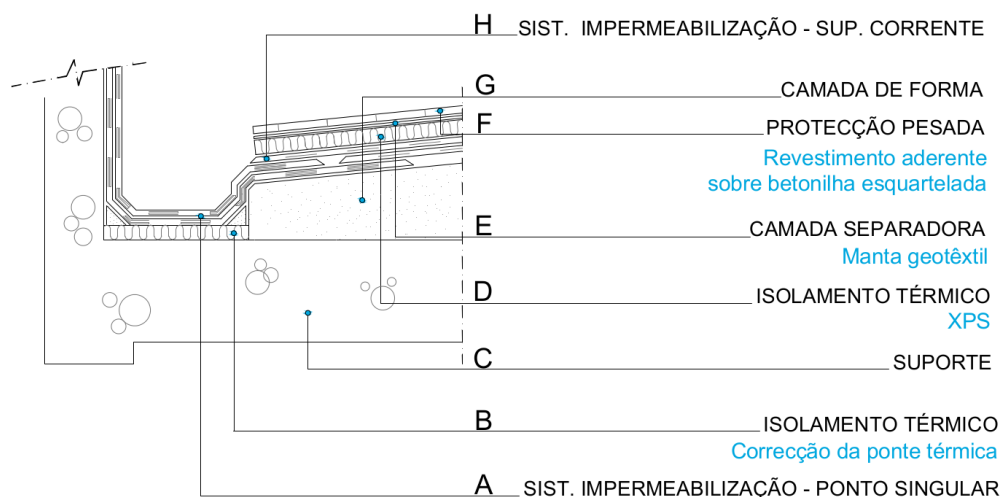


Fig. 3.21: Correcta execução de um remate em zona de caleira [IMPERALUM, sda].

Capítulo 4

Termografia de infravermelhos

4.1 História da termografia de infravermelhos

Em 1777 o cientista Landriani, de nacionalidade italiana, ao utilizar termómetros de mercúrio e um prisma, descobre que o efeito de aquecimento provocado pela luz solar aumentava continuamente ao longo do espectro visível, desde o violeta até ao vermelho. Mas é por volta de 1800 que se descobrem os raios infravermelhos, através de experiências realizadas por Sir William Herschel, astrónomo real do rei Jorge III de Inglaterra [FLIR, 2007]. Herschel acaba por fazer uma experiência semelhante à de Landriani, mas ao movimentar o termómetro de mercúrio para a zona mais escura, para lá da cor vermelha, verificou que a temperatura continuava a aumentar até que atingia o seu ponto máximo. Após essa descoberta, Herschel passa a denominar essa zona escura por espectro termométrico, que só mais tarde viria a ser designada como região infravermelha (IV) [FLIR, 2007].

Os termómetros de mercúrio foram utilizados para a medição da radiação infravermelha até 1829, ano em que Nobili inventou o par termoeléctrico. Nesta altura, Melloni desenvolve um dispositivo mais avançado para detecção dos raios infravermelhos, designado de termopilha. Esse novo detector era constituído por vários pares termoeléctricos em série, com comportamento semelhante aos termopares, e era cerca de quarenta vezes mais sensível que os termómetros usados nessa época [FLIR, 2007].

Apenas em 1880 surgiram novos detectores de radiação infravermelha, os bolómetros. Estes aparelhos, inventados por Langley, permitiam medir pequenas diferenças de temperatura através da variação da resistência eléctrica.

No período entre a Primeira e a Segunda Guerra Mundial desenvolveram-se dois novos tipos de dispositivos: o dispositivo detector de imagens e o detector de protões [FLIR, 2007], ambos utilizados para fins militares. Só por volta de 1950 é que os primeiros equipamentos para formação de imagem térmica foram comercializados, devido ao sigilo militar que tinha existido até à altura.

Na década de 90, com a substituição dos sistemas de refrigeração de azoto líquido por sistemas de refrigeração termoeléctricos, surgiram equipamentos com detectores matriciais que permitiam a leitura simultânea da temperatura superficial em vários pontos [BARREIRA, 2004].

Actualmente, as câmaras de termografia para além de apresentarem um aspecto mais compacto, semelhante ao das câmaras de vídeo (figura 4.1), também são mais versáteis, pois podem permitir o registo da imagem real e do termograma em simultâneo, assim como a realização de vídeos.



Fig. 4.1: Exemplo de uma câmara de termografia actualmente comercializada.

4.2 Teoria da radiação: princípios físicos

4.2.1 Noções de transmissão de calor

Entre o interior e o exterior de um edifício podem existir variações térmicas que originam mecanismos de transferência de calor. A transferência de calor caracteriza-se como sendo um processo onde há transmissão de energia entre dois sistemas, ocorrendo sempre que exista uma diferença de temperatura entre eles. O fluxo de calor transferido entre esses dois sistemas é conduzido do ambiente mais quente para o ambiente mais frio. No entanto, a variação permanente das condições de temperatura, da radiação solar e de outros parâmetros climáticos, assim como das condições ambiente impostas ao interior do edifício, levam a que o regime de transmissão de calor seja não-estacionário [MATIAS, 2001].

De forma a realizar análises mais práticas e de menor complexidade, em alguns casos é frequente adoptar hipóteses simplificativas. Essas hipóteses consideram que as condições interiores e exteriores se mantêm estáveis durante um período de tempo significativo, ou seja, que a transmissão de calor se dá em *regime estacionário*¹⁶.

A transmissão de calor pode ocorrer de três formas distintas: condução, convecção e radiação.

A condução pode ser definida como a transferência de calor de uma região mais quente para uma mais fria dentro do mesmo meio - sólido, líquido ou gasoso - ou de um corpo para o outro, se estes estiverem em contacto. A transferência de energia no interior do corpo é originada pelo movimento aleatório dos seus átomos, moléculas e/ou electrões constituintes. A um material, com uma dada temperatura, corresponde um determinado estado de agitação molecular [HENRIQUES, 2011]. Entre duas zonas com temperaturas distintas, o calor será transmitido da zona com maior estado de agitação para a zona com menor estado de agitação até ser atingido o estado de equilíbrio térmico.

Na convecção o calor deixa de ser transportado apenas por agitação molecular e passa a ser transportado também pelo fluido em movimento. A convecção é um mecanismo característico dos líquidos e dos gases já que é necessário a existência de movimento, qualidade incompatível com os sólidos. A variação da temperatura das moléculas faz com que estas, através da agitação molecular, sofram uma alteração relativa da sua posição que, conseqüentemente, leva a uma variação da massa volúmica. Por sua vez, a variação da massa volúmica do fluido, associada à força da gravidade, origina os movimentos característicos desta forma de transmissão de calor. Diz-se que a convecção é forçada quando o movimento do fluido é provocado por uma causa externa (vento, ventilador mecânico, etc.), e

¹⁶Regime estacionário - As condições do sistema permanecem constantes, pois a energia do sistema não varia.

designa-se por natural quando o movimento do fluido resulta apenas da variação da densidade originada por diferenças térmicas [MATIAS, 2001].

As trocas de calor por radiação, por sua vez, correspondem à energia emitida por um corpo através de ondas electromagnéticas ou por partículas (fotões). Essa energia é emitida do material devido aos movimentos rotacionais das partículas constituintes (electrões, iões, átomos ou moléculas). Assim, como estas partículas estão sempre em movimento, acima da temperatura do zero absoluto (0 K), a energia térmica é sempre emitida [MALDAGUE, 2001b]. Ao contrário da condução e da convecção, a transmissão de calor por radiação não necessita de um meio material para que ocorra transporte de energia, ou seja, há emissão de energia térmica por radiação no vácuo.

Como os estudos a realizar se focam, principalmente, na detecção de anomalias por termografia de infravermelhos, a transmissão de calor por radiação vai ser abordada nos pontos seguintes de forma mais detalhada.

4.2.2 Conceitos básicos

A transmissão de calor por radiação pode ser explicada de duas formas distintas. Uma das abordagens, desenvolvida por Maxwell, considera que radiação se propaga através de ondas electromagnéticas, caracterizadas por uma determinada frequência e energia [MALDAGUE, 2001b]. Segundo a teoria da radiação electromagnética essas ondas propagam-se à velocidade da luz, c [em m/s], constante que se relaciona com o comprimento de onda, λ [em μm], e a frequência, f [em Hz], através da expressão seguinte:

$$c = \lambda \cdot f \quad (4.1)$$

A outra forma de análise da radiação é através da teoria quântica de Planck. A teoria proposta por Max Planck considera que a radiação resulta do movimento de um feixe de partículas (fotões) e que a energia radiante não é emitida de forma contínua, mas sim em quantidades discretas denominadas de *quantum*. A quantidade discreta de energia, *quantum*, é obtida através da equação 4.2, em que h [em J/s] é a constante de Planck [MALDAGUE, 2001a].

$$E = h \cdot f \quad (4.2)$$

Apesar das duas teorias serem válidas, a teoria da radiação electromagnética é mais adequada para explicar as propriedades radiativas dos líquidos e dos sólidos, enquanto que a teoria quântica de Planck apresenta resultados mais satisfatórios quando estão em causa as propriedades radiativas dos gases [MODEST, 2003].

Relacionando as equações 4.1 e 4.2, correspondentes aos dois modelos físicos referidos, obtém-se a seguinte expressão:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (4.3)$$

Desta forma, concluí-se que o comprimento de onda, λ , é inversamente proporcional à energia de radiação electromagnética. Assim, quando menor for o comprimento de onda da radiação em causa, maior vai ser a energia a ela associada.

4.2.3 Espectro electromagnético

A radiação electromagnética pode ser representada na forma de espectro (figura 4.2), que varia em função do comprimento de onda [MATIAS, 2001]. Este espectro divide-se em várias regiões consoante o tipo de radiação, começando pelos raios cósmicos, com comprimento de onda muito reduzido, e estendendo-se até às ondas de rádio, com maiores comprimentos de onda.

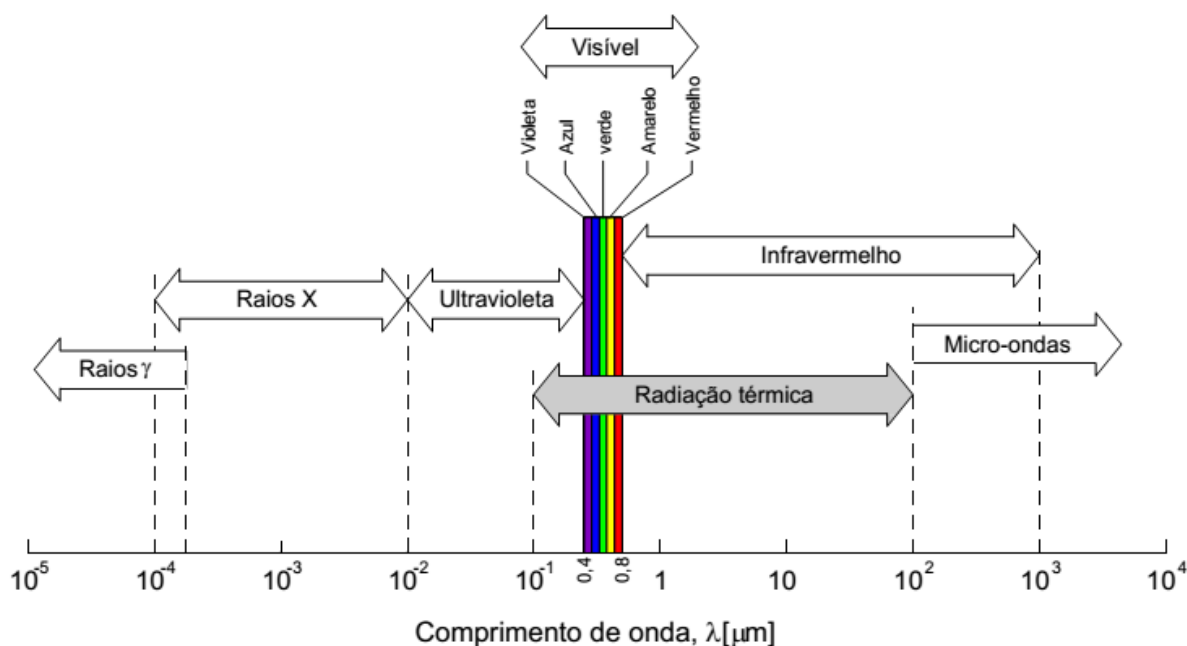


Fig. 4.2: Espectro electromagnético [MATIAS, 2001]

Radiação térmica

A radiação mais importante para a análise em edifícios é designada por radiação térmica, uma zona mais limitada do espectro electromagnético [HENRIQUES, 2011]. Este tipo de radiação é a única ligada aos fenómenos de transferência de calor e o seu comprimento de onda varia entre os $0,1\mu m$ e os $100\mu m$, como é visível na figura 4.2.

Nesta gama incluem-se:

- Uma pequena parte da radiação ultravioleta, de $0,1\mu m$ a $0,4\mu m$;
- A radiação visível, de $0,4\mu m$ a $0,78\mu m$;
- Uma grande parte da radiação infravermelha, dos $0,78\mu m$ a $100\mu m$.

A radiação UV, por sua vez, divide-se em quatro bandas mais restritas: UV-vácuo ($0,1\mu m$ a $0,2\mu m$), UV-C ($0,2\mu m$ a $0,28\mu m$), UV-B ($0,28\mu m$ a $0,315\mu m$) e UV-A ($0,315\mu m$ a $0,4\mu m$).

A região do visível é a radiação electromagnética detectada pelo olho humano e corresponde a uma parcela significativa da energia térmica. A radiação visível apresenta um tipo de cor específico para cada comprimento de onda, como ilustrado na figura 4.3.

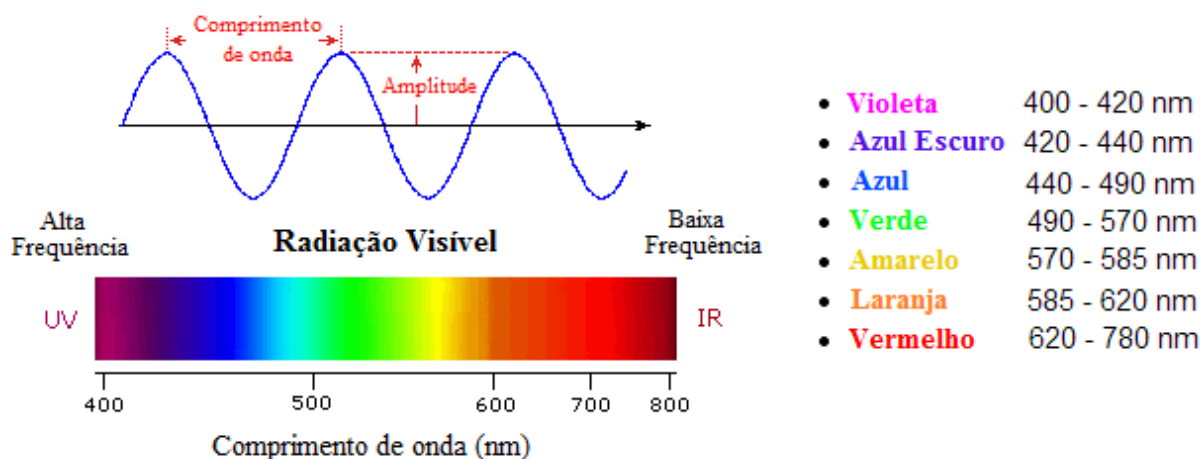


Fig. 4.3: Caracterização das cores da radiação visível em termos de comprimentos de onda [REUSCH, 2013].

A radiação infravermelha, que resulta do aumento da agitação térmica de partículas atômicas por aquecimento, ocupa também uma grande parte radiação térmica [MALDAGUE, 2001a]. Este tipo de radiação é detectável através de câmaras termográficas, como se irá verificar ao longo do desenvolvimento experimental. Os comprimentos de onda deste tipo de radiação variam entre os $0.78\mu m$ e os $1000\mu m$. À semelhança da radiação UV, também é possível dividir os infravermelhos em gamas distintas. Segundo Maldague (2001b), a radiação infravermelha divide-se em:

- Infravermelhos próximos (Near Infrared ou NIR), de $0.78\mu m$ a $1.5\mu m$;
- Infravermelhos médios (Medium Infrared ou MIR), de $1.5\mu m$ a $20\mu m$;
- Infravermelhos distantes (Far Infrared ou FIR), dos $20\mu m$ a $1000\mu m$.

As câmaras termográficas, como se verificará mais à frente no ponto 4.3.6, trabalham na gama do infravermelho médio.

Radiação solar

A radiação térmica emitida pelo Sol denomina-se de radiação solar e o seu comprimento de onda varia entre $0.28\mu m$ e os $2.5\mu m$ abrangendo, por isso, parte da radiação UV (UV-B e UV-A), toda a radiação visível e uma parte da radiação infravermelha [IKEMATSU, 2007].

Por existir uma parte do estudo que se foca na caracterização da reflectância de amostras de membranas de betume polímero, quando a aplicação de tintas reflectantes é de extrema importância a utilização do espectro solar de referência para avaliar o desempenho desses produtos. Como o espectro solar de referência dá a conhecer a energia solar que chega à superfície terrestre, analisando-o é possível perceber qual o tipo de radiação que mais afecta as superfícies da envolvente de um edifício numa situação real. As distribuições espectrais de referência (figura 4.4) - a curva de distribuição espectral da energia solar acima da atmosfera terrestre (ETR) e a curva de distribuição espectral da energia solar ao nível da água do mar (Radiação Global) - foram obtidas para uma superfície orientada a Sul com uma inclinação de 38° [ASTM, 2012].

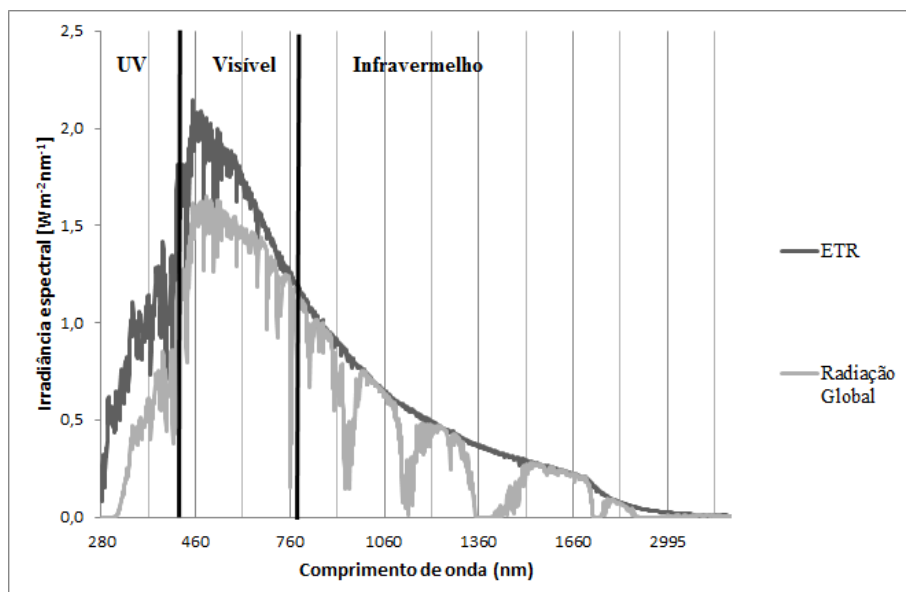


Fig. 4.4: Distribuições espectrais de referência correspondentes à irradiância espectral [ASTM, 2012]

É através do espectro correspondente à radiação global, representado na figura 4.4, que é possível perceber a quantidade de energia proveniente do sol consoante o tipo de radiação:

- Radiação Ultravioleta, corresponde aproximadamente a 3% do espectro solar;
- Radiação visível, corresponde a cerca de 45% do espectro solar;
- Radiação infravermelha, corresponde a 52% do espectro solar.

4.2.4 Radiação do corpo negro

Considera-se corpo negro um objecto que seja capaz de absorver toda a radiação que incide sobre ele, independentemente da direcção e do comprimento de onda. De acordo com a Lei de Kirchhoff, que será explicada no ponto 4.2.6, o corpo negro também é capaz de emitir toda a radiação em todos os comprimentos de onda, energia essa que é emitida até que seja atingido o equilíbrio termodinâmico com a envolvente. Por estes motivos, o corpo negro é também denominado de radiador e emissor perfeito [MALDAGUE, 2001b].

O comportamento de um corpo negro pode ser definido através de três expressões distintas, expressões essas que fazem parte das três leis que vão ser mencionadas de seguida.

Lei de Planck

A lei de Planck descreve a distribuição da energia emitida por um corpo negro em função do comprimento de onda e para uma dada temperatura. O poder emissivo espectral é dado pela seguinte expressão:

$$E_{\lambda,n}(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad (4.4)$$

Em que λ é o comprimento de onda [em μm], T a temperatura termodinâmica [em K], h a constante de Planck [em $J \cdot s$], c a velocidade da luz [em $m \cdot s^{-1}$], e K a constante de Boltzmann [em $J \cdot K^{-1}$].

É muito comum representar a Lei de Planck numa família de curvas, como se exemplifica figura 4.5.

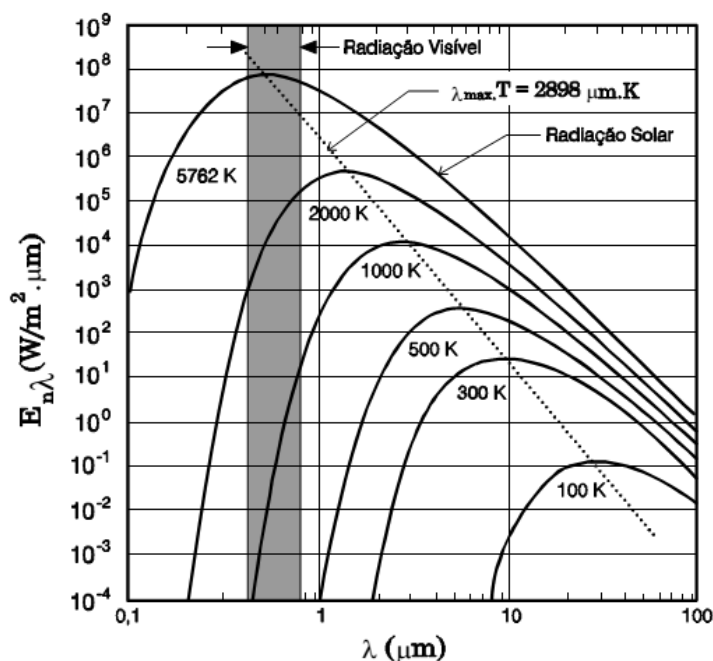


Fig. 4.5: Poder emissivo espectral de um corpo negro segundo a Lei de Planck [MATIAS, 2001]

Ao analisar a figura 4.5 é possível confirmar que o poder emissivo espectral, para uma dada temperatura, varia de forma contínua com o comprimento de onda. Por sua vez, verifica-se também que, quanto mais alto for o valor da temperatura do corpo negro, menor vai ser o valor do comprimento de onda para o qual o poder emissivo espectral atinge o seu valor máximo.

Lei de Wien

A Lei de Wien, equação 4.5, obtém-se derivando a Lei de Planck em ordem ao comprimento de onda (λ) e permite obter, para uma dada temperatura, o comprimento de onda da radiação emitida para o qual o poder emissivo espectral é máximo [MATIAS, 2001].

$$\lambda_{máx} = \frac{2898}{T} \quad (4.5)$$

Na equação 4.5 $\lambda_{máx}$ é o comprimento de onda máximo [em μm], e T a temperatura termodinâmica [em K].

A expressão 4.5 pode ser representada graficamente através da recta a tracejado representada na figura 4.5.

Para corpos mais frios que o Sol, que apresenta uma temperatura aparente de $6000 K$, os comprimentos de onda para os quais a radiação emitida é máxima tendem a ser maiores [BARREIRA, 2004]. Como a maioria dos materiais de construção são aquecidos a temperaturas bastante inferiores, quando expostos ao Sol, os comprimentos de onda para os quais o poder emissivo é máximo incluem-se geralmente dentro da gama do infravermelho. Como exemplo, se um corpo se encontrar a uma temperatura de $298 K$, ou $25^\circ C$, atinge um poder emissivo máximo para o comprimento de onda de $9.72 \mu m$, valor esse que se encontra na gama do infravermelho médio (ver ponto 4.2.3).

Lei de Stefan-Boltzmann

Integrando a equação 4.4, correspondente à lei de Planck, em todos os comprimentos de onda do espectro electromagnético ($0 \leq \lambda \leq \infty$), obtém-se a seguinte expressão:

$$E_n = \sigma \cdot T^4 \quad (4.6)$$

Em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann [$em W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$], e T a temperatura absoluta [$em K$].

Através da expressão acima representada obtém-se o poder emissivo total. Esta expressão é utilizada quando o fluxo de calor é emitido ao longo de todo o espectro, ao contrário da equação 4.4, que é utilizada quando o fluxo de calor emitido é específico de um comprimento de onda. A equação de Stefan-Boltzmann é representada graficamente pela área que fica abaixo da curva de Planck, para uma dada temperatura, como se pode observar na figura 4.5.

Quando se definiu o conceito de corpo negro, afirmou-se que era um objecto capaz de absorver e emitir toda a energia que sobre ele incide, ou seja, um absorvador e um emissor perfeito. Assim sendo, o corpo negro é uma referência com a qual os corpos reais são comparados [MATIAS, 2001].

4.2.5 Radiação do corpo não-negro

Os corpos negros perfeitos, como já se referiu no ponto 4.2.4, servem como referência para os corpos reais, ou seja, são objectos que não existem na realidade. No entanto, um corpo não-negro, ou corpo real, pode apresentar um comportamento próximo do corpo negro em certas regiões espectrais.

Como as leis mencionadas no ponto anterior só podem ser aplicadas ao corpo negro, devem ser feitas correcções para que se possam aplicar essas fórmulas a todas as superfícies reais (ver ponto 4.2.6 na parte da emitância).

4.2.6 Propriedades radiativas de uma superfície

Um corpo real comporta-se de forma distinta do corpo negro quando incide sobre ele a radiação térmica. Neste caso uma parte da radiação incidente pode ser absorvida (α), outra parte reflectida (ρ) e uma outra transmitida (τ). As fracções referidas vão depender, por sua vez, de vários factores, tais como o comprimento de onda (λ), a orientação (θ) e a temperatura (T). No entanto, a rugosidade da superfície e a presença de contaminantes (como a presença de lubrificantes ou manchas de óleo) também podem influenciar essas propriedades [MALDAGUE, 2001b].

Segundo Modest (2003) a terminologia adoptada para as propriedades radiativas de uma superfície deve acabar em "*tância*" quando a superfície do material é rugosa ou apresenta algum tipo de contaminação ou acabar em "*tividade ou sividade*" quando a superfície é totalmente lisa. As normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) também utilizam a terminologia "*tância*".

Ao longo deste trabalho adoptar-se-á a terminologia "*tância*" para as propriedades em questão. Esta decisão foi tomada pelo facto da maioria das superfícies das membranas de impermeabilização, utilizadas no estudo da caracterização das propriedades radiativas, serem algo rugosas.

Absortância, reflectância e transmitância

A absortância, a reflectância e a transmitância são propriedades que dependem do comprimento de onda, da temperatura e da direcção, como já se mencionou. No entanto, para um dado comprimento de onda a soma entre as três parcelas é sempre igual à unidade, como se mostra na expressão 4.7 [HART, 1991].

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (4.7)$$

em que:

α_λ É a absorptância espectral hemisférica. Esta propriedade é dada pela razão entre a energia radiante que é absorvida pela superfície e a energia radiante total que incide sobre ela, para um dado comprimento de onda.

ρ_λ É a reflectância espectral hemisférica. Esta propriedade é dada pela razão entre a energia radiante que é reflectida pela superfície e a energia radiante total que incide sobre ela, para um dado comprimento de onda.

τ_λ É a transmitância espectral hemisférica. Esta propriedade é dada pela razão entre a energia radiante que é transmitida pela superfície e a energia radiante total que incide sobre ela, para um dado comprimento de onda.

As três propriedades apresentadas na expressão 4.7 são adimensionais e variam entre 0 e 1. Todas elas são dependentes da temperatura, do comprimento de onda e do ângulo de incidência com que a radiação atinge a superfície [MATIAS, 2001].

Quando a absorptância toma um valor igual à unidade ($\alpha = 1$) o corpo em questão designa-se de corpo negro, pois absorve a totalidade da energia radiante. Já um corpo opaco caracteriza-se por ter transmitância nula ($\tau = 0$), simplificando a expressão 4.7 para:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (4.8)$$

Num corpo semitransparente (figura 4.6) as três propriedades tomam valores inferiores à unidade, pois a soma entre elas é que é igual a um, como se exemplifica na expressão 4.7.

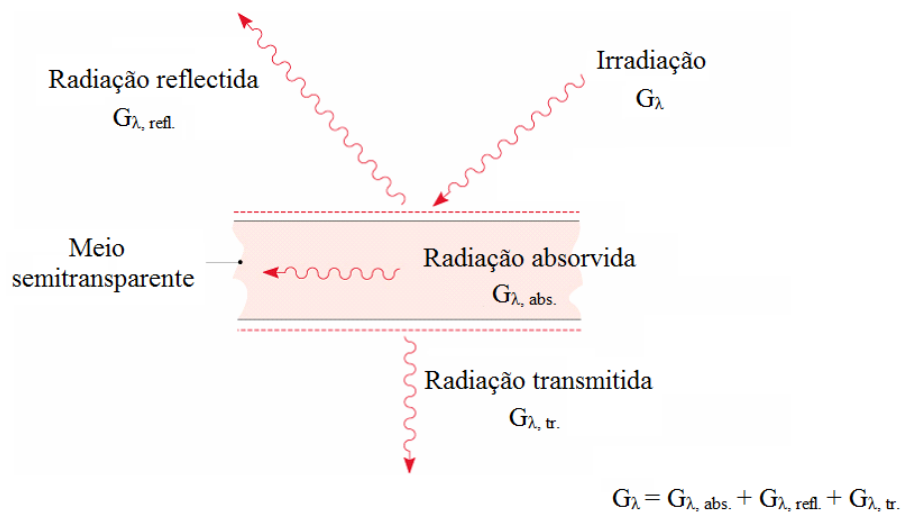


Fig. 4.6: Radiação absorvida, reflectida e transmitida num corpo semitransparente [IST, sd].

O corpo transparente, por sua vez, é caracterizado apenas pela transmitância. Neste caso o corpo transmite toda a energia radiante ($\tau = 1$) [MATIAS, 2001].

A maioria dos materiais de construção são corpos opacos. Como estes materiais não transmitem radiação, a interacção entre o material e a radiação incidente dá-se apenas à superfície, a alguns micrómetros de profundidade. Por esse motivo, designam-se as propriedades radiativas como sendo propriedades radiativas de uma superfície [MATIAS, 2001].

Emitância

A emitância é a propriedade radiativa que caracteriza a energia emitida pela superfície de um corpo. No entanto, a determinação desta propriedade é um pouco complexa, visto ser uma característica que varia com a temperatura, com a direcção da radiação emitida e com o comprimento de onda dessa mesma radiação. Por este motivo, para a sua caracterização é necessário definir quatro parâmetros [MALDAGUE, 1994]:

i) Emitância espectral direccional - É definida pela equação 4.9,

$$\varepsilon_{\theta,\lambda} = \frac{R_{\lambda}}{R_{\lambda,n}} \quad (4.9)$$

em que R_{λ} é a radiância espectral da superfície do corpo real [$em W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$], e $R_{\lambda,n}$ a radiância espectral do corpo negro [$em W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$].

A Radiância de uma superfície é considerada como uma propriedade que quantifica o fluxo que passa através de uma área reduzida (dA), dentro de um pequeno ângulo ($d\theta$), segundo uma direcção que faz um ângulo (θ) com a normal à superfície [MALDAGUE, 1994].

ii) Emitância total direccional - É definida pela equação 4.10,

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{R}{R_n} \quad (4.10)$$

em que R é a radiância total da superfície do corpo real [$em W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$], e R_n a radiância total do corpo negro [$em W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$].

A expressão 4.10 resulta da integração da emitância espectral direccional em todos os comprimentos de onda.

iii) Emitância espectral hemisférica - É definida pela equação 4.11,

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda,r}}{E_{\lambda,n}} \quad (4.11)$$

em que $E_{\lambda,r}$ é o poder emissivo espectral da superfície real [$em W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$], e $E_{\lambda,n}$ o poder emissivo espectral do corpo negro [$em W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$].

A equação 4.11 foi obtida integrando a emitância espectral direccional em todas as direcções.

iv) Emitância total hemisférica - Esta característica é definida pela razão entre o poder emissivo total de uma superfície real e poder emissivo total de um corpo negro à mesma temperatura, como se representa na expressão 4.12,

$$\varepsilon = \frac{E_r}{E_n} \quad (4.12)$$

A equação 4.12 resulta da integração da emitância espectral direccional em todas as direcções e em todos os comprimentos de onda.

Na maioria dos casos são assumidas simplificações em relação ao cálculo da emitância, admitindo-se que as superfícies dos corpos são cinzentas e difusas. Quando se considera uma superfície cinzenta, as suas propriedades radiativas são independentes do comprimento de onda. Considerando a superfície difusa, as suas propriedades são independentes da direcção. Admitindo os dois tipos de superfície, os quatro parâmetros referidos anteriormente simplificam-se de acordo com a equação 4.13 [MALDAGUE, 1994].

$$\varepsilon = \varepsilon_{\theta,\lambda} = \varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\lambda} \quad (4.13)$$

Para além destas simplificações também é usual fazer uma outra, denominada de Lei de Kirchoff, que consiste na igualdade entre os valores da absorptância total hemisférica e da emitância total hemisférica da superfície de um corpo ($\alpha = \varepsilon$). Esta igualdade pode ser aplicada sempre que a temperatura do corpo e a da envolvente sejam da mesma ordem de grandeza e que o sistema formado por essas duas temperaturas esteja em equilíbrio térmico [MATIAS, 2001].

No entanto, tanto a Lei de Kirchoff como a definição de superfície cinzenta, não podem ser assumidas quando o material é irradiado pela radiação solar. Esta limitação deve-se ao facto do erro associado a estas simplificações ser demasiado elevado [MATIAS, 2001]. No caso da lei de Lei de Kirchoff, esse erro elevado explica-se facilmente pela expressão 4.14 [IST, sd].

$$\varepsilon(T) = \frac{E_r(T)}{E_n(T)} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) \cdot E_{n,\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{E_n(T)} \quad (4.14)$$

A emitância total hemisférica, como se verifica na expressão 4.14, apenas depende da temperatura. No entanto, a absorptância total hemisférica depende do comprimento de onda e da direcção da radiação incidente, neste caso específico a radiação solar. Como se exemplificou no ponto 4.2.4, a maioria das superfícies, quando aquecidas pelo Sol, emitem radiação na região dos infravermelhos, ao contrário da radiação solar que incide na superfície, que apresenta comprimentos de onda mais baixos (entre $0.28\mu m$ e $2.5\mu m$), como já se referiu. Por esse motivo, os comprimentos de onda de uma propriedade para a outra são bastante diferentes, o que leva a erros muito elevados.

Aplicando a lei de Stefan-Boltzmann à expressão 4.12, deduz-se a fórmula 4.15, que corresponde ao poder emissivo do corpo real:

$$E_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4.15)$$

em que ε é a emitância [$em W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$], σ a constante de Stefan-Boltzmann [$em W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$], e T a temperatura absoluta [$em K$].

4.3 Termografia de infravermelhos: um ensaio não destrutivo

4.3.1 Generalidades

A termografia de infravermelhos permite, para além da avaliação da qualidade térmica de edifícios, utilização mais usual no sector da engenharia civil, a detecção e a identificação de anomalias na envolvente do edifício. Neste trabalho, em específico, pretende-se utilizar este equipamento como o objectivo de detectar anomalias em coberturas planas, caracterizadas pela presença de água ou ar sob os revestimentos de impermeabilização.

A utilização de uma câmara termográfica permite obter uma imagem da distribuição das temperaturas superficiais do elemento em estudo, sem qualquer tipo de contacto físico entre ambos. No entanto, apesar da imagem nos fornecer informação acerca das temperaturas superficiais, o equipamento mede a radiação emitida pela superfície do elemento construtivo, na gama dos infravermelhos.

Para que seja possível realizar este tipo de ensaios é necessário existir um fluxo térmico através do elemento em análise, criado por uma diferença de temperatura ou então imposto por uma fonte de calor. Para garantir este fluxo térmico utilizam-se geralmente dois métodos distintos: método passivo e método activo.

4.3.2 Método passivo

No método passivo o diferencial de temperatura necessário à visualização das anomalias resulta apenas da diferença de temperatura existente entre o ambiente interior do edifício e o ambiente exterior, que dá origem a um fluxo térmico através da envolvente. A intensidade desse fluxo térmico é proporcional à resistência térmica do elemento da envolvente e à diferença de temperatura entre os ambientes, a qual se recomenda ser superior a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [FLIR, 2007].

4.3.3 Método activo

No método activo recorre-se ao aquecimento do elemento construtivo por acção de um fluxo térmico imposto, naturalmente, através da incidência da radiação solar, ou artificialmente, utilizando lâmpadas ou outro tipo de dispositivos que provoquem aquecimento (ópticos ou mecânicos).

Os dispositivos de aquecimento, utilizados no aquecimento artificial, podem ser colocados do mesmo lado da câmara termográfica, modo de reflexão, ou colocados no lado oposto à medição da radiação emitida, modo de transmissão. O modo de reflexão permite identificar as anomalias quando estas estão mais junto à superfície, ao contrário do modo de transmissão, que permite detectar anomalias mais profundas.

De seguida são referidas as várias formas de aquecimento utilizadas no método activo.

Termografia de impulso (Pulsed Thermography)

A termografia activa de impulso é um dos métodos de aquecimento mais utilizados na termografia de infravermelhos. A razão da sua popularidade está relacionada com a rapidez da inspecção [MALDAGUE, 2001b].

Este método utiliza um curto impulso de energia térmica para o aquecimento da superfície do elemento e, posteriormente, permite a monitorização do abaixamento da temperatura dessa mesma superfície através de uma câmara termográfica. Esse aquecimento pode durar cerca de um milissegundo, no caso dos metais, ou até alguns segundos, dependendo das propriedades da amostra e das anomalias existentes.

No entanto, a temperatura à superfície do material altera-se rapidamente depois da perturbação térmica inicial. Este facto deve-se à propagação da frente térmica, por difusão, para o interior do elemento assim como pelas perdas por radiação e convecção.

Quando existe uma anomalia esta provoca uma alteração na taxa de difusão. Desta forma, quando se observa a temperatura superficial do elemento, a zona da anomalia apresenta uma área com temperaturas distintas em relação à temperatura da envolvente, que não contém anomalias.

O pulso térmico pode ser originado a partir de diversos equipamentos tais como os lasers, os flashes fotográficos, lâmpadas ou sopradores de ar quente.

Aquecimento contínuo (Stepped Heating)

Neste tipo de aquecimento a monitorização da temperatura superficial do material, através da câmara termográfica, é realizada durante a aplicação de um impulso de energia térmica contínuo, ou seja, a superfície é continuamente aquecida numa potência relativamente baixa. No aquecimento contínuo as variações de temperatura entre zonas, ao longo do tempo, também permitem detectar anomalias, tal como no aquecimento por termografia pulsada [MALDAGUE, 2001b].

Termografia modulada (Lock-in Thermography)

A termografia modulada consiste em submeter a superfície do material a uma estimulação térmica sinusoidal, originando ondas térmicas no interior do elemento. No entanto, devem ser realizados diversos ensaios para que seja analisada toda a profundidade da amostra, variando a frequência de modulação da estimulação térmica.

A medição da temperatura superficial da amostra ao longo do tempo também pode ser realizada por uma câmara termográfica e permite a reconstrução da onda térmica, obtendo-se as características da onda (amplitude e fase).

Nas zonas onde existem anomalias há alteração da fase da onda, permitindo assim a diferenciação entre as zonas com e sem anomalias.

Termografia pulsada de fase (Pulsed Phase Thermography)

A termografia pulsada de fase combina as vantagens das técnicas de termografia de impulso e da termografia modulada [MALDAGUE, 2002]. Esta técnica aquece a superfície do material por aplicação de pulsos de energia térmica, tal como a termografia de impulso, mas o processamento de dados é realizado no domínio da frequência, como acontece na termografia modulada. O fenómeno pode-se explicar através do princípio da sobreposição, ou seja, um pulso de energia térmica pode ser considerado como um somatório de várias ondas sinusoidais com diferentes frequências. Assim, aplicar um pulso de energia térmica sobre a superfície é o mesmo do que aplicar várias ondas com amplitudes e fases diferentes.

Aplicando ferramentas matemáticas, como a transformada de Fourier, é possível obter a amplitude e a fase do sinal de resposta, analisando-se a partir deste ponto de forma semelhante à termografia modulada.

Termografia por vibração (Vibrothermography)

Nesta técnica são aplicadas vibrações mecânicas externas à superfície do material, com frequências de excitação fixas, geralmente entre 0 a 25 kHz, que posteriormente se convertem em energia térmica [MALDAGUE, 2001b].

Quando existe uma descontinuidade na superfície do material, como por exemplo uma fissura, o calor que é gerado por fricção é libertado através desses locais. Este fenómeno deve-se à ressonância específica da descontinuidade existente no material, diferente da que existe numa zona sem qualquer tipo de anomalia. Nestes casos ao aumentar ou diminuir as frequências de excitação, surgem gradientes térmicos que permitem detectar o local onde a anomalia se encontra.

No quadro 4.1, são referidas as vantagens e as limitações de cada um dos métodos de aquecimento anteriormente referidos.

Quadro 4.1: Vantagens e limitações de cada um dos métodos de aquecimento utilizados na termografia [MALDAGUE, 2001b].

Método de aquecimento	Vantagens	Limitações
Passivo	Não existe contacto físico nem interação com o material	Apenas funciona quando existe um diferencial de temperatura considerável entre o interior e o exterior do espaço
Termografia de impulso	Não existe contacto físico com o material e o pulso de energia térmica é aplicado, geralmente, de forma rápida	Necessita de uma fonte externa de aquecimento e a superfície de inspecção é normalmente limitada
Aquecimento contínuo	Não existe contacto físico com o material	Necessita de uma fonte externa de aquecimento e pode ocorrer sobreaquecimento do material
Termografia modulada	Não existe contacto físico com o material, podem ser inspeccionadas grandes áreas e a análise é feita através de imagens de amplitude e de fase	Necessita de uma fonte modulada para excitação térmica do material, é necessário realizar vários ensaios e deve-se conhecer previamente os locais onde se encontram as anomalias
Termografia pulsada de fase	Apresenta as mesmas vantagens da termografia pulsada	A profundidade das anomalias é obtida através da transformada de Fourier, não sendo por isso muito fiável, e é necessário conhecer muitas características do material
Termografia por vibração	Detecção de fissuras fechadas	Dificuldade em gerar as vibrações mecânicas, os contrastes térmicos nem sempre são visíveis e há contacto com o material durante a vibração

No âmbito deste trabalho, o método de aquecimento adoptado em laboratório foi semelhante à termografia de impulso. No entanto, não se optou por nenhum dos dispositivos que geralmente se utilizam, mas sim por uma placa de aquecimento já existente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Como a potência da placa referida não era muito elevada, o tempo de aquecimento relativo a este método alterou-se, necessitando-se de um intervalo de tempo mais prolongado para se obterem diferenciais de temperatura aceitáveis (ver ponto 5.3.1).

4.3.4 Vantagens e limitações da termografia de infravermelhos

Qualquer ensaio tem os seus pontos fortes e fracos. O método de ensaio não destrutivo de termografia de infravermelhos não é excepção à regra.

Podem nomear-se as seguintes vantagens ao optar-se por este método [MALDAGUE, 2002, ALMEIDA, 2010]:

- inspecção rápida;
- técnica adequada para a inspecção de grandes superfícies;
- não existe contacto com a superfície;
- ensaio seguro para o técnico que o realiza, uma vez que a radiação envolvida no processo não é prejudicial à saúde;
- em geral, os resultados são relativamente fáceis de interpretar;
- possibilidade de grande variedade de aplicações;
- análise efectuada em tempo real.

No entanto, este método também apresenta algumas limitações [MALDAGUE, 2002, ALMEIDA, 2010]:

- dificuldade em obter uma estimulação energética rápida que garanta o aquecimento uniforme de grandes superfícies;
- as perdas térmicas por radiação e convecção alteram a temperatura superficial do elemento, dificultando a análise dos resultados;
- custo elevado do equipamento;
- o equipamento necessita de um diferencial significativo de temperatura entre a superfície do material e a temperatura ambiente para conseguir detectar anomalias;
- dificuldade em detectar anomalias muito profundas se não existir a imposição de um fluxo de calor intenso;
- a técnica é influenciada pelas variações da emitância do material, pela reflectância da superfície e pelas condições atmosféricas, ver ponto 4.3.5.

4.3.5 Factores que influenciam a medição da radiação emitida

Apesar da termografia ser um método relativamente simples, onde os resultados podem ser interpretados com alguma facilidade, há que ter especial atenção aos factores que influenciam este tipo de medição. Antes do início de qualquer inspecção esses factores devem ser tidos em conta, de forma a não se realizar análises incorrectas.

É muito frequente confundir a existência de anomalias no elemento em análise com alterações da temperatura superficial. Essas alterações podem ser provocadas por vários factores externos tais como o sombreamento, reflexão de outras superfícies, diferentes tipos de acabamentos, condições atmosféricas (que podem variar ao longo do ensaio quando realizado *in situ*), e também pelos parâmetros que são introduzidos na câmara termográfica (emitância, temperatura reflectida, temperatura ambiente, distância ao elemento, etc.) [BARREIRA, 2004].

Variação da emitância

A emitância de um material, como já se mencionou no ponto 4.2.6, é uma propriedade radiativa que varia com a temperatura, com a direcção da radiação emitida pela superfície (variando, por esse motivo, com o ângulo de observação) e com o comprimento de onda.

i) Variação da emitância com a temperatura

Quando se aplicam as simplificações relativas a uma superfície difusa e cinzenta, ou seja, que as propriedades radiativas são independentes da direcção e do comprimento de onda, é muito frequente admitir-se o conceito de emitância total hemisférica (ver ponto 4.2.6). Neste caso a emitância passa a ser constante para uma determinada temperatura.

Os materiais não metais apresentam geralmente uma emitância total hemisférica elevada, geralmente acima de 0.80 [BARREIRA, 2004].

ii) Variação da emitância com o ângulo de observação

A emitância também pode variar de acordo com o ângulo de observação. Por este motivo, as superfícies não planas apresentam uma emitância aparente, que varia de ponto para ponto apesar de não haver alteração do material [BARREIRA, 2004].

No entanto, mesmo em superfícies planas, o ângulo de observação adoptado para a câmara termográfica também pode originar uma alteração das temperaturas superficiais obtidas. De acordo com Hart (1991) a variação da emitância para os não metais é quase nula quando se adoptam ângulos de observação entre os 0° e os 60° (figura 4.7). O ângulo a considerar é definido entre a posição da câmara termográfica e a normal à superfície .

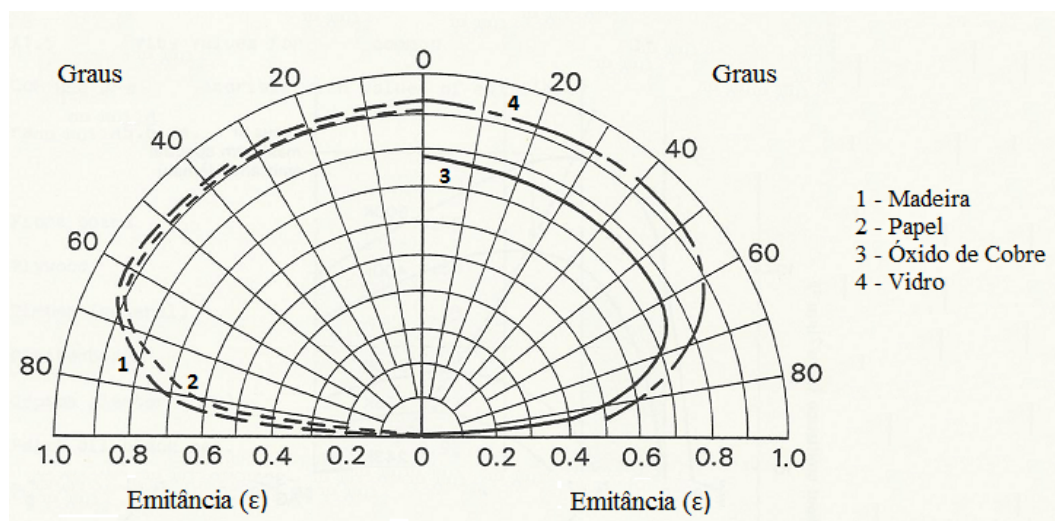


Fig. 4.7: Variação da emitância de alguns não metais com o ângulo de observação [HART, 1991].

Na figura 4.7 cada linha corresponde a um tipo de material: linha 1 (madeira), linha 2 (papel), linha 3 (óxido de cobre) e linha 4 (vidro).

iii) Variação da emitância com o comprimento de onda

O comprimento de onda é outra das grandezas que faz variar a emitância. No entanto, essa variação é diferente consoante o material seja sólido ou então esteja na forma líquida ou gasosa. Nos sólidos essa variação dá-se de forma relativamente lenta, ao contrário dos gases e dos líquidos, que apresentam uma variação de emitância mais acentuada.

A emitância dos não metais tende a aumentar com o comprimento de onda, embora de uma forma aleatória [BARREIRA, 2004].

Reflectância

A medição da radiação infravermelha que é emitida por um objecto, através do método não destrutivo de termografia de infravermelhos, também é influenciada pela reflectância do material.

A radiação emitida pela superfície, quando o corpo se encontra a uma temperatura T_0 , resulta da sobreposição de três efeitos [BARREIRA, 2004]:

- reflexão de uma fracção de energia proveniente da radiação emitida pelo ambiente, equivalente à radiação emitida por um corpo negro à temperatura T_a ;
- transmissão de uma fracção de energia proveniente da radiação emitida pelo fundo, se o corpo for parcialmente transparente; esta transmitância é equivalente à radiação emitida por um corpo negro à temperatura T_f ;
- emitância resultante da própria superfície do corpo, quando este se encontra à temperatura T_0 .

Os três efeitos referidos são representados esquematicamente na figura 4.8.

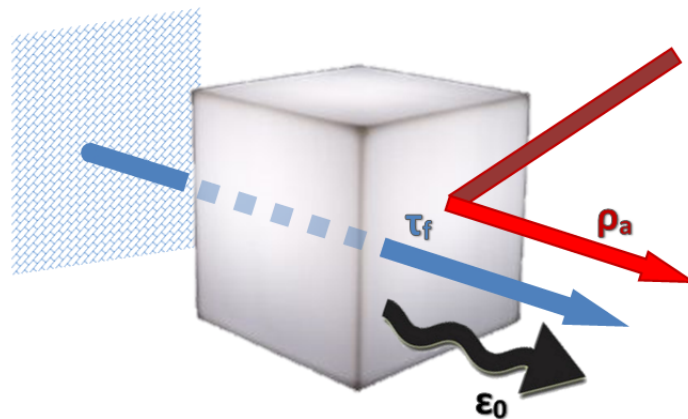


Fig. 4.8: Esquema representativo da sobreposição de efeitos que influencia a radiação emitida por uma superfície parcialmente transparente (adaptado de [BARREIRA, 2004]).

Atenuação atmosférica

Ao realizar medições com a câmara termográfica há sempre uma distância adoptada entre o equipamento e a superfície do elemento a inspeccionar. O que acontece na maior parte das vezes, é que a presença

da atmosfera entre o elemento construtivo e a câmara, quando a inspecção é realizada *in situ*, origina erros nas medições. Este facto deve-se, essencialmente, à atenuação atmosférica, ou seja, a radiação emitida pela superfície em análise é atenuada até chegar à câmara de infravermelhos. O erro resultante desta condicionante é sistemático, pois depende da gama espectral utilizada, da distância adoptada e das condições meteorológicas [BARREIRA, 2004]. De forma a reduzir este efeito, não devem ser admitidas distâncias superiores a 10m entre a superfície do elemento em análise e a câmara termográfica.

Para além da atenuação atmosférica, as variações de temperatura do ambiente durante a inspecção, assim como a turbulência, também são factores que prejudicam a utilização do método. Estes dois últimos condicionantes influenciam as medições por criarem heterogeneidades no índice de refração do ar e, desta forma, provocarem a degradação da imagem de infravermelhos [BARREIRA, 2004].

Outros factores

Quando as medições são realizadas *in situ* a acção do vento deve ser tida em conta, especialmente quando se faz sentir com mais intensidade. A acção do vento provoca alteração das temperaturas superficiais, aumentando as trocas de calor por convecção e, dessa forma, influencia directamente a imagem termográfica. Se as medições forem realizadas em laboratório também devem ser evitadas correntes de ar que incidam directamente sobre o elemento em análise.

O contacto directo entre a radiação solar e a câmara termográfica também deve ser evitado. Desta forma garante-se a qualidade da imagem obtida pelo equipamento.

Quando há sombreamento da superfície em estudo a imagem termográfica também é, naturalmente, alterada. Como consequência, podem ser realizadas análises incorrectas das medições obtidas.

A distância excessiva entre a câmara e o elemento construtivo, para além de influenciar a atenuação atmosférica, como já foi referido, também origina uma diminuição da resolução da imagem obtida.

4.3.6 Equipamentos de medição

Actualmente, a radiação infravermelha pode ser medida através de equipamentos como os termómetros pontuais de infravermelhos, os *scanners* de linha e as câmaras termográficas, sendo este último o equipamento utilizado para elaboração desta dissertação de mestrado.

Uma Câmara termográfica, como já foi referido no ponto 4.3.1, mede a radiação infravermelha emitida a partir da superfície do elemento em estudo e reproduz imagens térmicas através da representação de uma distribuição de temperaturas superficiais. Este tipo de equipamento funciona geralmente numa banda espectral entre $3\mu\text{m}$ a $5\mu\text{m}$ ou de $7.5\mu\text{m}$ a $13\mu\text{m}$ e a imagem pode ser obtida por varrimento ou pelo sistema FPA (Focal Plane Array).

A ThermaCAM P640 da FLIR Systems (figura 4.9), modelo existente no LNEC, funciona numa gama espectral de $7.5\mu\text{m}$ a $13\mu\text{m}$ e o detector utiliza o sistema FPA.



Fig. 4.9: Câmara termográfica utilizada ao longo do estudo.

Quando o detector utiliza o sistema FPA é constituído por uma matriz bidimensional de sensores que captam todos os pontos da imagem em simultâneo [BARREIRA, 2004]. As características do modelo utilizado são descritas no Anexo A.1.

4.4 Propriedades térmicas de materiais

A detecção de anomalias por termografia de infravermelhos vai centra-se na detecção de água e ar sob pressão que, por vezes, surgem por baixo do revestimento de impermeabilização. Para a detecção dessas anomalias será necessário, em primeiro lugar, compreender quais as características que influenciam o comportamento desses materiais quando sujeitos a solicitações de energia térmica.

A inércia térmica caracteriza a resistência de um material à alteração do seu estado termodinâmico. Esta propriedade relaciona-se com a capacidade que o material tem em armazenar calor. Assim, quanto maior for a inércia térmica, mais facilmente é absorvido o calor a que o material está sujeito sem que haja uma grande variação do seu estado termodinâmico. As principais propriedades térmicas relacionadas com a inércia térmica são o calor específico, c_p , a condutibilidade térmica, λ , a massa volúmica, ρ , a difusividade térmica, a , e a efusividade térmica, b . As duas últimas são propriedades importantes quando a análise do comportamento dos materiais é efectuado em regime não-estacionário.

O calor específico, c_p , de um material é a quantidade de calor que deve ser fornecida a uma unidade de massa para a sua temperatura aumentar 1°C . O calor específico, ou capacidade térmica mássica, varia com o tipo de material em questão. Como parte do desenvolvimento experimental vai incidir na detecção de empolamentos e manchas de humidade, é de todo o interesse apresentar os valores do calor específico, correspondentes ao ar e à água, assim como a respectiva inércia térmica de cada um dos materiais.

Quadro 4.2: Calor específico e inércia térmica da água e do ar (adaptado de [MENDONÇA, 2005]).

Materiais	Calor específico [$J/(kg \cdot K)$]	Inércia térmica
Água	4187	Forte
Ar	1000	Fraca

Do quadro acima, conclui-se que é necessário fornecer muito mais calor à água de forma a haver a mesma variação de temperatura na água e no ar.

A condutibilidade térmica, λ [em $W/(m \cdot K)$], é uma propriedade que caracteriza a forma como um material, termicamente homogéneo, conduz a energia térmica no seu interior. Este parâmetro representa a quantidade de calor [em $W/(m^2)$] que atravessa uma espessura unitária [em m] de um material, quando entre as duas faces planas e paralelas desse material existe uma diferença de temperatura unitária [em K] [SANTOS e MATIAS, 2006].

O quociente entre a massa de um material e o seu volume designa-se por massa volúmica, ρ [em $kg/(m^3)$]. Assim, esta propriedade permite quantificar a quantidade de massa contida numa unidade de volume.

Quadro 4.3: Condutibilidade térmica e massa volúmica da água e do ar (adaptado de [SANTOS e MATIAS, 2006]).

Materiais	Condutibilidade térmica [$W/(m \cdot K)$]	Massa volúmica [$kg/(m^3)$]
Água	0.60	1000
Ar	0.025	1.23

A difusividade térmica, a [em m^2/s], exprime a capacidade que um determinado material tem em transmitir uma variação de temperatura, ou seja, a velocidade com que o calor se propaga no seu interior. O fluxo de calor que atravessa um determinado material varia directamente com a difusividade térmica [PEREIRA, sd]. Assim, materiais com baixa difusividade térmica absorvem mais lentamente os fluxos de energia térmica a que estão sujeitos, ou seja, aquecem mais lentamente. Esta propriedade é função da condutibilidade térmica, λ [em $W/(m \cdot K)$], do calor específico, c_p [em $J/(kg \cdot K)$], e massa volúmica do material, ρ [em kg/m^3], obtendo-se da seguinte forma:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (4.16)$$

Já a efusividade térmica, b [em $J/(K \cdot m^2 \cdot s^{0.5})$], por sua vez, está relacionada com a quantidade de energia térmica que o material é capaz de absorver, ou libertar. A efusividade pode ser calculada pela equação 4.17.

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad (4.17)$$

Nesta equação:

- λ condutibilidade térmica [em $W/(m \cdot K)$];
- ρ massa volúmica [em kg/m^3];
- c_p calor específico [em $J/(kg \cdot K)$].

As oscilações de temperatura sofridas no material, originadas por um determinado fluxo de calor, são inversamente proporcionais à efusividade térmica [PEREIRA, sd]. Por esse facto, os materiais com baixa efusividade térmica sofrem variações de temperatura muito maiores que os materiais com elevada efusividade térmica, como é o caso da água.

Quadro 4.4: Difusividade térmica e efusividade térmica da água e do ar (adaptado de [REMPEL e REMPEL, 2013]).

Materiais	Difusividade térmica [m^2/s]	Efusividade térmica [$J/(K \cdot m^2 \cdot s^{0.5})$]
Água	0.14×10^{-6}	1580
Ar	20×10^{-6}	5

Capítulo 5

Detecção de anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço

5.1 Metodologia de estudo

Neste trabalho e tal como anteriormente referido, pretendeu-se otimizar a aplicação do método não destrutivo de termografia de infravermelhos na detecção de anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço à vista.

Como é necessária a introdução de vários parâmetros na câmara termográfica, antes de se proceder à inspecção realizou-se um estudo complementar que visou a determinação das propriedades radiativas da superfície das membranas de impermeabilização. Para a caracterização das membranas de impermeabilização foram determinadas várias propriedades, entre elas a reflectância direccionada na região do visível, a reflectância total, na região dos UV, no visível e no infravermelho próximo, e a emitância. Para esses ensaios foram preparadas amostras de vários tipos de membranas de impermeabilização, nomeadamente membranas de betume polímero (auto-protegidas e sem qualquer tipo de protecção) e membranas de PVC. Aproveitando um estudo que decorreu em paralelo sobre a eficiência de tintas reflectantes em paredes [GONÇALVES, 2014], foram aplicadas tintas reflectantes sobre amostras de membranas de betume polímero, de forma a verificar a sua eficácia sobre este tipo de materiais e a sua influência no comportamento térmico de uma cobertura.

Na detecção das anomalias em impermeabilizações em laboratório foram utilizados dois provetes: um provete com anomalias controladas (empolamentos na membrana de impermeabilização) e um outro sem qualquer tipo de anomalias (membrana totalmente aderente). Os provetes ensaiados resultaram da aplicação de membranas de betume polímero, através de soldadura, sobre duas lajetas térmicas com a face de betão voltada para cima, como se descreverá de forma mais aprofundada no ponto 5.3.2. O estudo em laboratório repartiu-se em duas fases: numa primeira fase verificou-se se era possível detectar a existência dos espaços de ar sob o revestimento de impermeabilização do provete com anomalias, enquanto que, numa segunda fase, após se injectar água entre o provete e o suporte numa zona não aderente, tentou-se detectar a existência dessa mesma água através da câmara termográfica.

Para validar o método desenvolvido em laboratório foram efectuados ensaios *in situ*, tanto em provetes com anomalias controladas, anomalias essas detectadas previamente por mapeamento, como em várias coberturas, incluindo a cobertura de uma célula experimental no campus do LNEC onde, à partida, já se sabia da existência de infiltrações de água. Os provetes utilizados no exterior foram provetes previamente

sujeitos a ensaios de sucção, realizados na Unidade de Revestimentos de Coberturas (URC) do LNEC. A sua constituição será abordada mais detalhadamente no ponto 5.3.3.

5.2 Caracterização das propriedades radiativas do revestimento de impermeabilização

5.2.1 Generalidades

Os valores das propriedades radiativas obtidas em laboratório são de extrema importância para a correcta interpretação das termografias a realizar, principalmente a emitância, visto ser um dos parâmetros a introduzir na câmara termográfica, fundamental na definição da temperatura superficial (ver ponto 4.2.6). Encontrava-se a decorrer, durante o mesmo período dos estudos das anomalias em terraço, ensaios sobre a eficiência de tintas reflectantes em paredes exteriores [GONÇALVES, 2014]. Como seria de todo o interesse analisar a influência destas tintas nas propriedades radiativas da membrana de impermeabilização foram realizados alguns ensaios para o efeito.

5.2.2 Membranas de impermeabilização estudadas

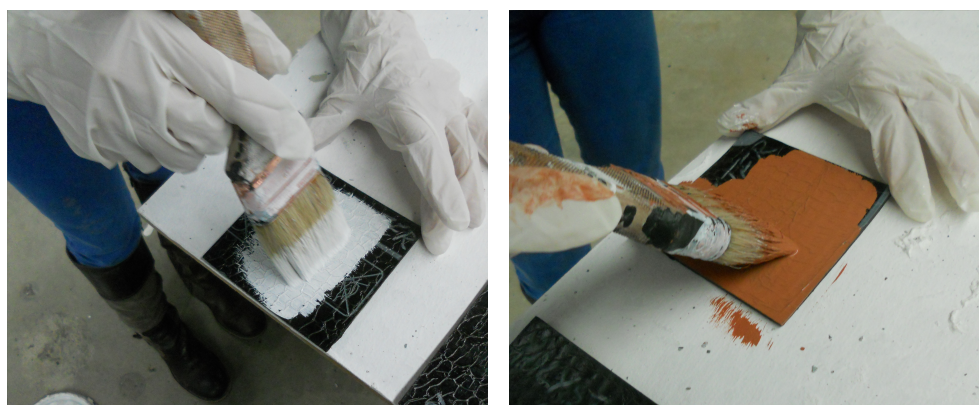
Para a realização de ensaios para a determinação da reflectância (tanto a direccionada como a total) no laboratório de fotometria e no laboratório de química, foram realizadas amostras de membranas de betume polímero e de PVC com dimensões de $0.10m \times 0.10m$. Nas amostras constituídas por membranas de betume polímero, optou-se por caracterizar a membrana com e sem a protecção do granulado mineral, pois é muito frequente encontrar membranas sem qualquer tipo de protecção em coberturas em terraço, apesar de ser um procedimento inadequado pelos motivos referidos ao longo do Capítulo 3 (deficiente protecção). As características de cada tipo de membrana e as designações utilizadas ao longo dos ensaios são apresentadas no quadro 5.1.

Quadro 5.1: Características das amostras utilizadas para a realização dos ensaios nos laboratórios de química e fotometria e respectiva simbologia

Tipo de membrana	Cor do acabamento	Simbologia
Membrana de betume polímero SBS auto-protegida com granulado mineral	Cinzento	XC
Membrana de betume polímero APP auto-protegida com granulado mineral	Branco	XB
Membrana de PVC plastificado	Cinzento	PVC
Membrana de betume polímero APP com acabamento superior e inferior em filme de polietileno	Preto	ASF
Membrana de betume polímero APP auto-protegida com granulado mineral	Extra-branco	XEB

Nas amostras de membranas de betume polímero, com ou sem protecção de granulado mineral, foi aplicada, em cada um dos tipos, tinta reflectante de cor branca (figura 5.1(a)) e de cor telha (figura 5.1(b)).

5.2. Caracterização das propriedades radiativas do revestimento de impermeabilização



(a) Tinta reflectante de cor branca (ASF/BR).

(b) Tinta reflectante de cor telha (ASF/TLH).

Fig. 5.1: Aplicação das tintas reflectantes nas amostras de betume polímero.

Para avaliar a repetibilidade dos resultados, prepararam-se dois provetes de cada tipo, tanto para as membranas de betume polímero (pintadas ou não) como para as membranas de PVC, determinando os resultados finais através da média dos dois provetes. Assim, todas as amostras utilizadas ao longo dos ensaios, consoante o tipo de membrana e a cor da tinta aplicada, são apresentadas no quadro 5.2.

Quadro 5.2: Definição das amostras a ensaiar nos laboratórios de química e fotometria consoante o tipo de membrana e a cor da tinta aplicada.

Tipo de membrana	Tinta reflectante		
	Não	Branca	Telha
Membrana de betume polímero SBS auto-protegida com granulado mineral (acabamento de cor cinzenta)	XC_1	XC/BR_1	XC/TLH_1
	XC_2	XC/BR_2	XC/TLH_2
Membrana de betume polímero APP auto-protegida com granulado mineral (acabamento de cor branca)	XB_1	XB/BR_1	XB/TLH_1
	XB_2	XB/BR_2	XB/TLH_2
Membrana de PVC plastificado (acabamento de cor cinzenta)	PVC_1	-----	-----
	PVC_2	-----	-----
Membrana de betume polímero APP com acabamento superior e inferior em filme de polietileno (acabamento de cor preta)	ASF_1	ASF/BR_1	ASF/TLH_1
	ASF_2	ASF/BR_2	ASF/TLH_2
Membrana de betume polímero APP auto-protegida com granulado mineral (acabamento de cor extra-branca)	XEB_1	XEB/BR_1	XEB/TLH_1
	XEB_2	XEB/BR_2	XEB/TLH_2

De forma a verificar a influência do sistema de pintura e nomeadamente da aplicação de um primário antes da colocação da tinta reflectante foram preparadas mais quatro amostras, com a aplicação do primário nas amostras mais rugosas (membranas de betume polímero auto-protegidas com granulado

mineral) e nas amostras mais lisas (membranas de betume polímero com acabamento superior em filme de polietileno). A simbologia utilizada para essas amostras, consoante o tipo de membrana e o tipo de cor da tinta aplicada, é apresentada no quadro 5.3.

Quadro 5.3: Definição das amostras com aplicação prévia de primário consoante o tipo de membrana e a cor da tinta aplicada.

Tipo de membrana	Tinta reflectante	
	Branca	Telha
Membrana de betume polímero SBS auto-protegida com granulado mineral (acabamento de cor cinzenta) e aplicação de primário	XC/BR_P	XC/TLH_P
Membrana de betume polímero APP com acabamento superior e inferior em filme de polietileno e aplicação de primário (acabamento de cor preta)	ASF/BR_P	ASF/TLH_P

O primário aplicado é de cor branca e tem como características principais não esfoliar ou descascar e permitir uma elevada aderência a diversos tipos de substratos.

5.2.3 Ensaios realizados

Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

O equipamento utilizado para determinar a reflectância direccional das amostras referidas no ponto 5.2.2 foi o Luminómetro CS-100 da Minolta (figura 5.2), equipamento existente no Núcleo de Acústica, Iluminação, Componentes e Instalações (NAICI) do LNEC. As características técnicas do aparelho constam no Anexo A.2.



Fig. 5.2: Luminómetro CS-100 da Minolta [MINOLTA, sdb].

Este equipamento, utilizado em conjunto com um goniómetro electrónico (que garantia a posição da amostra segundo vários ângulos definidos), permitiu que se obtivessem as coordenadas cromáticas para cada uma das amostras e a respectiva luminância, L [$em\ cd/m^2$].

Através das coordenadas cromáticas (x,y) obtém-se um diagrama bidimensional designado de Diagrama Cromático, onde são representadas todas as cores da região do visível. No diagrama cromático cada coordenada x e y permite a definição de uma determinada cor.

A Luminância, por sua vez, é dada pela intensidade luminosa por unidade de área aparente de uma superfície, numa dada direcção.

A utilização do luminómetro em conjunto com o goniómetro electrónico durante os ensaios realizados pode observar-se na figura 5.3.



Fig. 5.3: Determinação da luminância utilizando o luminómetro e um goniómetro electrónico.

Para a análise destas características adoptaram-se dois esquemas de colocação da amostra para a variação do ângulo:

- amostra perpendicular à fonte luminosa;
- amostra perpendicular ao luminómetro.

Para o esquema em que a amostra fica perpendicular à fonte luminosa foram adoptados ângulos de 15° , 30° , 45° e 60° com o luminómetro, enquanto que para o esquema em que a amostra fica perpendicular ao luminómetro se adoptaram os mesmos ângulos com a adição do ângulo de 75° com a fonte luminosa. A decisão de não se efectuar a leitura com o luminómetro a 75° , quando a amostra fica perpendicular à fonte luminosa, deveu-se à dificuldade em captar a superfície da amostra pelo equipamento, pois um ângulo era demasiado aberto.

De acordo com os ensaios realizados e para facilitar a compreensão do desenvolvimento experimental, é apresentado na figura 5.4 um esquema representativo da disposição adoptada para o luminómetro, para a fonte luminosa e para a amostra quando se determinou a luminância para os ângulos ($0^\circ/30^\circ$), ou seja, quando a amostra se encontrava perpendicular à fonte luminosa e fazia um ângulo de 30° com o luminómetro.

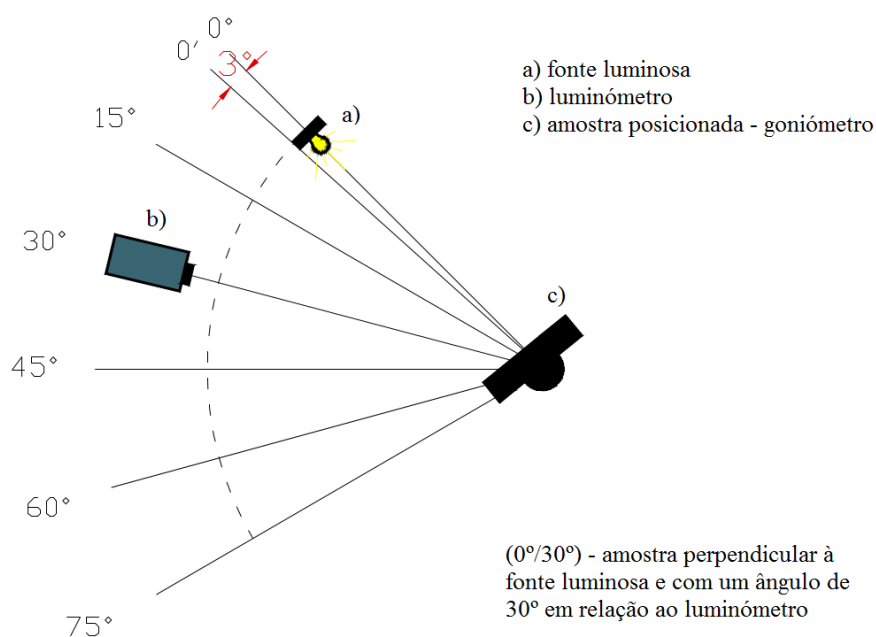


Fig. 5.4: Esquema da disposição do luminômetro, da fonte luminosa e da amostra para os ângulos (0°/30°).

Para que a fonte luminosa não se sobrepusse ao luminômetro ao medir a luminância para o ângulo (0°/0°), ou seja, a amostra perpendicular à fonte luminosa e ao luminômetro, foi necessário um ângulo de 0° fictício. Esse ângulo denominou-se de 0' e encontrava-se exactamente a 3° 30' do ângulo de 0° onde estava posicionada a fonte luminosa.

Para calcular a reflectância direccionada da amostra em cada ângulo há que considerar a reflectância calibrada do padrão, $\rho_{calibrada}$ [em %], que toma um valor de 96.3%. Antes de se iniciar a medição da amostra propriamente dita, o padrão é colocado no local da amostra e são retirados três valores de luminância. Quando se inicia a medição registam-se também três valores de luminância para cada amostra e a respectivas coordenadas cromáticas, que neste caso específico não têm qualquer influência no estudo. No final da medição volta-se a colocar o padrão e são medidos de novo três valores de luminância, de forma a que se possa fazer uma média com os valores iniciais. Assim, a reflectância direccionada de uma amostra é obtida através da expressão 5.1.

$$\rho_{\theta} = \frac{\rho_{calibrada} \times L_{méd. amostra}}{L_{méd. padrão}} \quad (5.1)$$

Nesta expressão ρ_{θ} é a reflectância direccionada da amostra [em %], $\rho_{calibrada}$ a reflectância calibrada do padrão [em %], $L_{méd. amostra}$ a luminância média da amostra [em cd/m^2], e $L_{méd. padrão}$ a luminância média do padrão [em cd/m^2].

Reflectância total

A reflectância total das amostras foi obtida de duas formas distintas, de forma a verificar a repetibilidade dos resultados na região do visível e a analisar o comportamento das tintas reflectantes face à radiação ultravioleta e à radiação infravermelha. Assim, num dos ensaios essa propriedade foi obtida apenas na região do visível enquanto que no segundo ensaio a reflectância foi determinada na região dos UV, no visível e no infravermelho próximo (NIR).

Através do ensaio com a esfera integradora LMT RT 500, equipamento existente no NAICI do LNEC, obteve-se a reflectância total na região do visível, ou seja, entre os $0.4\mu m$ e os $0.78\mu m$.

No segundo tipo de ensaio, onde se utilizou o espectrofotómetro HITACHI modelo U-3300, equipamento existente no Núcleo de Materiais Orgânicos do LNEC, obteve-se a reflectância total na região dos UV, no visível e no NIR, analisando-se essa propriedade das amostras entre os $0.19\mu m$ e os $0.9\mu m$.

i) Esfera integradora LMT RT 500

A esfera integradora LMT RT 500 (figura 5.5) é um equipamento que permite obter a reflectância total (ρ), a reflectância difusa (ρ_d), a transmitância total (τ) e a transmitância difusa (τ_d) de amostras com superfícies planas de acordo com a norma DIN 5036 part.3 publicada por CIE No.38 (TC 2.3) de 1977, a ECE Regulation R46 e a norma ISO 5740 de 1982. As características técnicas do equipamento são apresentadas no Anexo A.3.

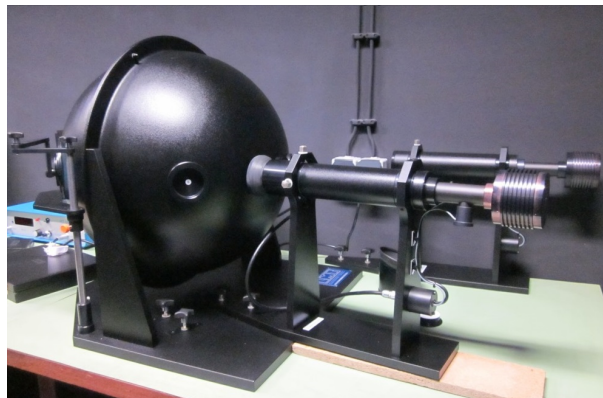


Fig. 5.5: Esfera integradora LMT RT 500 do NAICI, LNEC.

A reflectância total obtida através da esfera integradora é dada pela razão entre o fluxo reflectido (Φ_ρ) e o fluxo incidente (Φ) de uma amostra e expressa-se de acordo com a fórmula 5.2 [LMT, sd].

$$\rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi} = \frac{\int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda} \cdot \rho(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad (5.2)$$

Na fórmula $\Phi_{e,\lambda}$ é a distribuição de energia espectral de uma lâmpada com filamento de tungsténio a $T_d \approx 2856K$, $V(\lambda)$ a eficiência luminosa espectral relativa [em nm], e $\rho(\lambda)$ a reflectância espectral.

Para a medição da reflectância total, e de acordo com a figura 5.6, na abertura 1 colocou-se primeiro o padrão branco (figura 5.7) para calibrar e depois cada uma das amostras. A abertura 3 foi utilizada para a incidência da luz e as restantes aberturas foram mantidas fechadas.

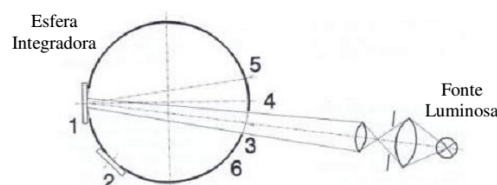


Fig. 5.6: Esquema a adoptar na determinação da reflectância total através da esfera integradora LMT RT 500 [LMT, sd].



Fig. 5.7: Padrão branco utilizado na calibração da consola de medição.

O procedimento experimental adoptado para a medição da reflectância total de cada uma das amostras em estudo é descrito de seguida:

- 1) Com a abertura 1 aberta e as luzes desligadas, ajusta-se a leitura da consola de medição para o valor de 0%.
- 2) Posteriormente, coloca-se o padrão branco na abertura 1 e ajusta-se a leitura da consola de medição para o valor de 88.7% (figura 5.8), valor da reflectância conhecido para o padrão branco.
- 3) Depois de se retirar o padrão branco, coloca-se a amostra na mesma abertura e efectuam-se três leituras de reflectância total, cada uma dessas leituras para uma determinada posição da amostra.



Fig. 5.8: Consola de medição calibrada com o valor da reflectância do padrão branco.

Como se realizaram três medições para cada amostra o valor da reflectância total dessa amostra é dado pela expressão 5.3.

$$\rho = \frac{\sum_1^3 \rho_{med.}}{3} \quad (5.3)$$

Na expressão ρ é a reflectância total da amostra [em %], e $\rho_{med.}$ a reflectância total da amostra para cada medição [em %].

ii) Espectrofotómetro HITACHI modelo U-3300

O espectrofotómetro HITACHI modelo U-3300 (figura 5.9), existente no Núcleo de Materiais Orgânicos (NMO) do LNEC, permite a medição de propriedades como a absorptância, a transmitância e a reflectância. A reflectância é obtida neste equipamento através de um espectro, que pode apresentar comprimentos de onda entre os 190nm e os 1100nm. No entanto, como o espectro obtido apresenta ruído excessivo para valores de comprimento de onda acima de 900nm, adopta-se geralmente o intervalo de 190nm a 900nm. Apesar de se adoptarem frequentemente intervalos entre os 190nm e os 900nm para o espectro de reflectância, verificou-se que para esse intervalo o espectro também apresentava um

ruído considerável. Por este motivo, durante o tratamento de dados através do Microsoft Excel apenas foi considerado o intervalo entre os $300nm$ e os $900nm$.

Na região do visível e dos infravermelhos o equipamento utiliza uma lâmpada de iodeto de tungsténio, enquanto que na região dos ultravioletas utiliza uma lâmpada de descarga de deutério. A troca entre os dois tipos de lâmpada ocorre entre os $325nm$ e os $370nm$. As características técnicas são apresentadas pormenorizadamente no Anexo A.4.

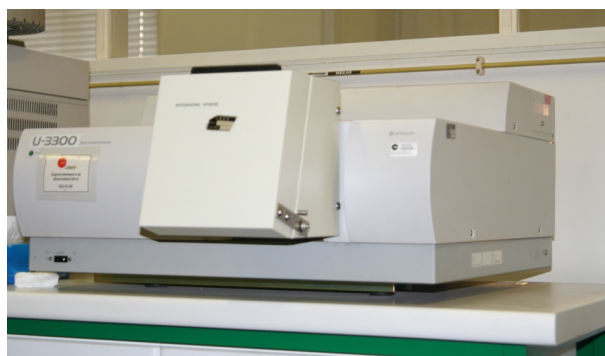


Fig. 5.9: Espectrofotómetro HITACHI modelo U-3300 do NMO, LNEC.

Para que fosse possível obter a reflectância total das amostras através deste equipamento teve de se adoptar um acessório designado por esfera integradora, visível na figura 5.9. O interior da esfera integradora é pintado com uma tinta branca altamente reflectora. Assim, o feixe de luz ao entrar na esfera reflecte-se repetidamente até encontrar a abertura onde se encontra o detector.

Para a medição da reflectância total da amostra foi necessário colocar uma placa difusora branca num dos compartimentos da esfera, como mostra a figura 5.10. Só depois de colocar a placa difusora é que o equipamento mede directamente a reflectância total.

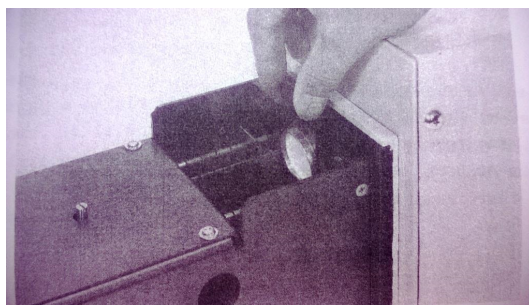


Fig. 5.10: Introdução da placa difusora branca na esfera integradora do espectrofotómetro [HITACHI, sda].

A metodologia de ensaio para obter o espectro de reflectância para cada uma das amostras é descrita de seguida:

- 1) Antes de começar o ensaio propriamente dito, colocam-se duas amostras padrão, constituídas por óxido de alumínio, na esfera integradora. Uma delas é colocada na abertura para a amostra padrão e, a outra, na abertura destinada às amostras a ensaiar (figura 5.11).
- 2) Depois de se colocarem as amostras padrão realiza-se um ajuste do espectro para 100%.

- 3) No momento em que o ajuste termina realiza-se uma calibração dos comprimentos de onda entre os $190nm$ e os $900nm$. Só depois deste último procedimento é que equipamento fica pronto para efectuar a leitura.
- 4) Introdução de vários parâmetros no equipamento. Nesta fase deve-se escolher o tipo de espectro (neste caso espectro de reflectância), a velocidade de varrimento (o valor adoptado foi de $300nm/min$), o intervalo de medição dos comprimentos de onda (neste caso o intervalo escolhido foi entre $190nm$ e os $900nm$), e o intervalo de resolução (adoptou-se um intervalo de $5nm$).
- 5) Depois de colocada a amostra em análise sobre a abertura correspondente inicia-se o ensaio (figura 5.12). Ao fim de um determinado intervalo de tempo obtém-se o espectro de reflectância, que deve ser guardado posteriormente.

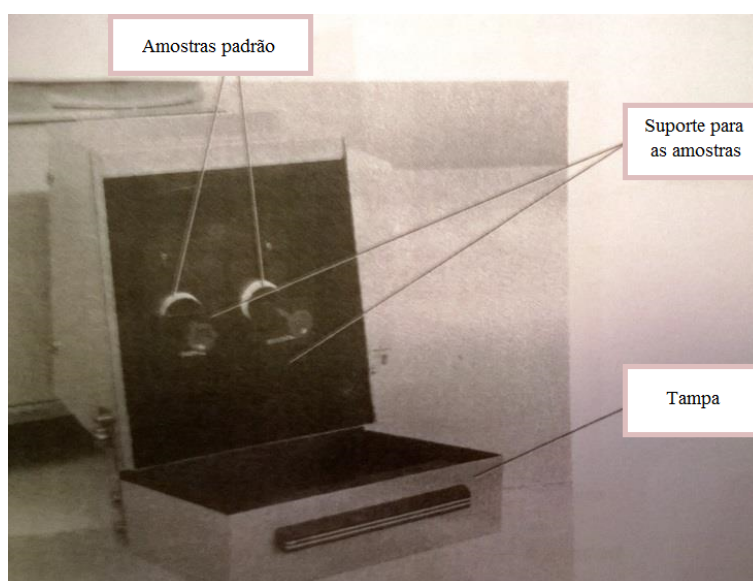


Fig. 5.11: Colocação das amostras padrão na esfera integradora para calibração do espectrofotómetro [HITACHI, sda].

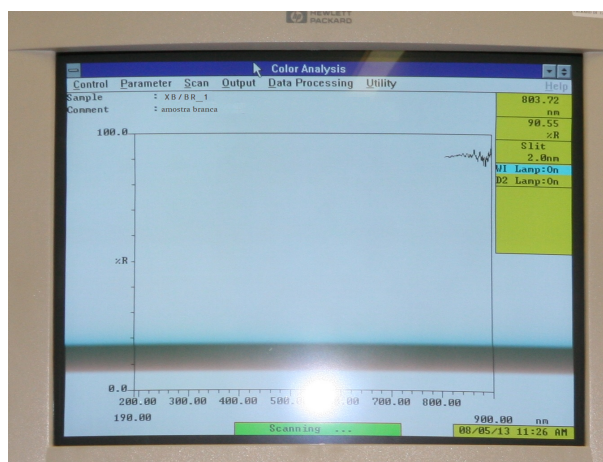


Fig. 5.12: Obtenção de um espectro de reflectância através do espectrofotómetro HITACHI modelo U-3300.

De forma a possibilitar a comparação dos valores de reflectância total na região do visível, com os obtidos através esfera integradora LMT RT 500, foi necessário determinar o valor de reflectância nessa zona do espectro. Para esse efeito, adoptou-se a simplificação apresentada na equação 5.4, que resulta da média de todos os valores de reflectância entre os comprimentos de onda na região do visível, ou seja, entre os 400nm e os 780nm.

$$\rho_{méd.} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \rho(\lambda_i) \quad (5.4)$$

Nesta equação $\rho_{méd.}$ é a reflectância total da amostra, resultante da média entre todos os valores de reflectância na região do visível, [em %], e $\rho(\lambda_i)$ a reflectância total da amostra para um dado comprimento de onda [em %].

Emitância

Para medir a emitância total das amostras de membranas de betume polímero utilizou-se um emissómetro modelo AE (figura 5.13). Este equipamento permite a medição dos valores da emitância total hemisférica de amostras planas a uma temperatura aproximada de 65 °C. O aparelho é acompanhado por um dispositivo de leitura externo, RD1, que também é visível na figura 5.13. As características técnicas do equipamento são apresentadas no Anexo A.5. Por não existir nenhum tipo de equipamento deste género no LNEC os ensaios foram realizados na Universidad Politécnica de Madrid.

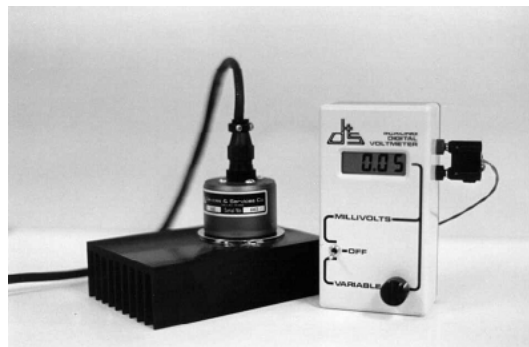


Fig. 5.13: Emissómetro modelo AE [D&S, sd].

A metodologia adoptada para o respectivo ensaio descreve-se de seguida:

- 1) O emissómetro modelo AE é colocado sobre uma amostra padrão de elevada emitância e o dispositivo de leitura externo, RD1, indica o valor de emitância dessa amostra.
- 2) Depois do emissómetro já se encontrar calibrado pelo passo anterior, é colocado sobre a amostra a ser ensaiada e o RD1 fornece os valores de emitância total da amostra em análise.

Neste caso, apenas foram avaliadas as amostras de betume polímero sem aplicação de tintas reflectantes (XC, XB, ASF e XEB), pois são estes tipos de materiais que, geralmente, se encontram *in situ* e sobre os quais foram realizadas as inspecções termográficas.

Apesar da temperatura de 65 °C adoptada no ensaio ser um pouco elevada, não existe qualquer problema relativamente ao escorrimento das membranas em estudo, pois estes materiais resistem até temperaturas de aproximadamente 120 °C.

5.3 Detecção de anomalias por termografia de infravermelhos

5.3.1 Generalidades

Para que se conseguisse uma aplicação do método de termografia de infravermelhos adequada, tanto em laboratório como posteriormente *in situ*, foi necessário considerar vários factores antecipadamente, nomeadamente as condições ambiente, o tipo de aquecimento dos provetes, assim como a garantia da perpendicularidade e da distância ideal entre a câmara termográfica e os provetes em estudo, de forma a minimizar os erros de leitura daí resultantes.

A medição das condições ambiente, tanto em laboratório como *in situ*, foi obtida através de um termo-higrómetro HygroLog digital (figura 5.14), existente nas instalações do NRI do LNEC e que é regularmente calibrado. Este equipamento permitiu obter de forma rápida, e com exactidão ($\pm 1.0\% HR / \pm 0.2^{\circ}C$), a humidade relativa e a temperatura do ar, parâmetros a introduzir na câmara termográfica antes de qualquer registo.



Fig. 5.14: Termo-higrómetro HygroLog digital.

De forma a complementar os dados relativos à humidade relativa e à temperatura obtidos com o termo-higrómetro HygroLog, também foi registada, de forma continua, a temperatura ambiente exterior. Essa medição foi realizada numa estação meteorológica situada no campus do LNEC.

Para a câmara termográfica conseguir detectar as anomalias num determinado elemento construtivo é necessário um diferencial de temperatura significativo, entre a superfície desse elemento e a temperatura ambiente. Para garantir esse diferencial de temperatura, tanto nos ensaios em laboratório como *in situ*, foi necessária a utilização de métodos activos. No caso dos ensaios em laboratório, o aquecimento dos provetes foi alcançado artificialmente através de uma placa de aquecimento (figura 5.15), como foi mencionado no ponto 4.3.3. Utilizando a câmara termográfica verificou-se que a placa de aquecimento, logo após ser ligada à corrente eléctrica, não apresentava um aquecimento homogéneo (figura 5.16(a)). De forma a verificar o tempo que o equipamento demorava a ficar com temperatura homogénea, em toda a superfície, foram realizadas termografias de 10 em 10 minutos. Após se obterem algumas termografias chegou-se à conclusão que a placa de aquecimento ficava com temperatura homogénea, de aproximadamente $60^{\circ}C$, ao fim de 40 minutos (figura 5.16(b)). Nos termogramas das figuras 5.16(a) e 5.16(b) é visível um rectângulo com temperaturas superficiais muito mais baixas. Essa zona corresponde ao local onde estava aderida fita de alumínio à superfície da placa de aquecimento.

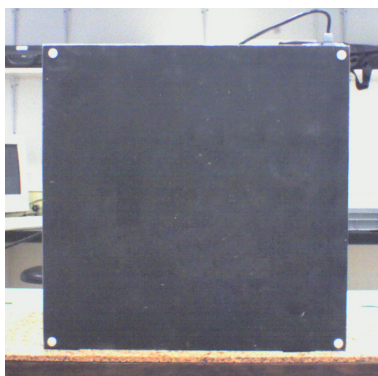
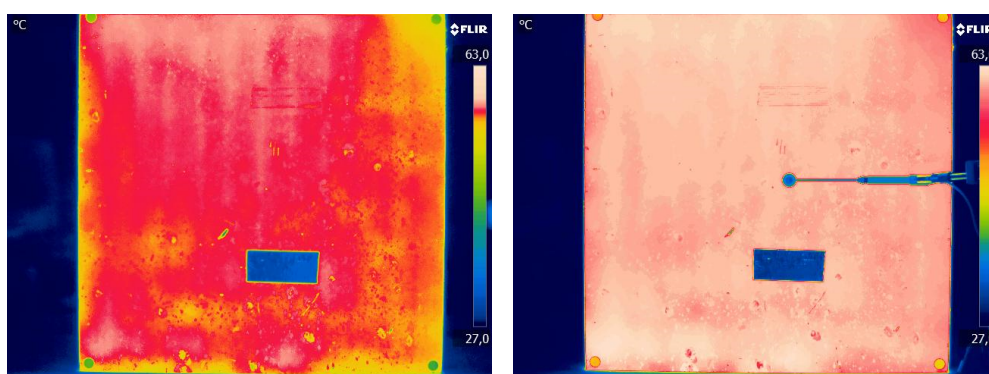


Fig. 5.15: Placa de aquecimento utilizada nos ensaios em laboratório.



(a) Termografia obtida logo após a ligação da placa de aquecimento à corrente eléctrica.

(b) Termografia obtida depois um período de tempo de cerca de 40 minutos após o aquecimento

Fig. 5.16: Análise da evolução da temperatura da placa de aquecimento através da termografia de infravermelhos.

Para garantir o diferencial de temperatura adequado para detecção das anomalias nos provetes estes foram aquecidos com a placa, durante um período de 30 minutos, procedendo-se às medições com a câmara termográfica logo após a retirada da placa de aquecimento. Nos ensaios dos provetes no exterior, assim como na inspeção das coberturas *in situ*, é o fluxo de calor imposto pelo Sol que garante o diferencial térmico necessário à detecção de anomalias, ou seja, o aquecimento das superfícies a estudar foi realizado naturalmente.

Por fim, também houve o cuidado de garantir que a câmara termográfica mantinha a perpendicularidade e a distância em relação às superfícies a analisar. Assim, todos os erros resultantes da alteração do ângulo de observação, como se mencionou no ponto 4.3.5, foram minimizados. A perpendicularidade e a distância entre a câmara termográfica e a superfície a analisar foi garantida utilizando um suporte metálico (figura 5.17), construído propositadamente para o efeito.

Para que fossem obtidas imagens térmicas de qualidade, o contacto directo entre a câmara termográfica e a radiação solar também foi evitado, tal como se aconselhou no ponto 4.3.5. A protecção da câmara foi conseguida através da utilização de um guarda-sol, como é visível na figura 5.17.



Fig. 5.17: Suporte metálico utilizado para garantir a perpendicularidade entre a câmara termográfica e a superfície a inspeccionar.

5.3.2 Ensaios em laboratório

Constituição e elaboração dos provetes

Para a realização dos ensaios em laboratório foi necessário proceder à preparação de dois provetes: um deles com anomalias provocadas e um outro sem qualquer tipo de anomalia. Estes provetes resultaram da aplicação de membranas de betume polímero, as mais frequentes em coberturas planas no nosso País, sobre duas lajetas térmicas, com a face em betão voltada para cima. Os provetes em estudo apresentam dimensões de $0.60m \times 0.60m$. Antes da aplicação das membranas sobre as lajetas foi necessária a remoção de todas as partículas soltas que se encontravam à superfície sendo, para o efeito, utilizado um jacto de ar (figura 5.18).



Fig. 5.18: Limpeza da superfície das lajetas com jacto de ar antes da aplicação das membranas de impermeabilização.

Após a limpeza adequada das superfícies, a membrana foi aplicada através de soldadura por chama

(figura 5.19(a)). Depois de realizada a soldadura procedeu-se a um arrefecimento da membrana aplicando um pano molhado sobre a superfície soldada, como se ilustra na figura 5.19(b).



(a) Aplicação da membrana por soldadura através de chama. (b) Arrefecimento da membrana aplicada através da utilização de um pano molhado.

Fig. 5.19: Aplicação das membranas de betume polímero sobre as lajetas.

Procedimento para provocar anomalias de forma controlada nos provetes

Para provocar as anomalias nos provetes utilizados para os ensaios em laboratório realizaram-se dois procedimentos distintos. O procedimento adoptado para garantir a existência de espaços de ar, sob o revestimento de impermeabilização, foi efectuado durante a elaboração dos provetes. No provete destinado à existência dessa anomalia, deixaram-se duas áreas laterais da membrana de impermeabilização sem qualquer aderência à superfície e uma zona central totalmente aderente. O segundo procedimento, para provocar a existência de água entre a membrana e o suporte, só foi realizado após se terem efectuado todas as termografias relativas à detecção dos empolamentos. Este facto permitiu que, durante essas medições, existisse a garantia de que apenas existia ar nas zonas não aderentes da membrana. Para provocar as anomalias relativas à água foi utilizada uma seringa para injeção do fluido (figura 5.20), garantido-se assim que o orifício efectuado à superfície da membrana era suficientemente reduzido para não provocar alterações dos resultados.



Fig. 5.20: Seringa utilizada para a injeção de água entre a membrana de impermeabilização e o suporte.

A água foi injectada numa das áreas não aderentes da membrana de impermeabilização, deixando a outra área não aderente intacta (com espaços de ar) para permitir a comparação entre os dois efeitos obtidos por termografia (presença de água/ presença de ar).

Procedimentos ao longo dos ensaios

Como já foi referido no ponto 5.3.1, para que fosse possível a detecção as anomalias através da câmara termográfica, foi necessário aquecer os provetes artificialmente com uma placa de aquecimento. Esse aquecimento com a placa quente foi efetuado em alternativa, por condução e por radiação. O objectivo deste último tipo de aquecimento foi ser o mais próximo possível daquele que se obtém no exterior através da radiação solar. No aquecimento por condução a placa foi colocada totalmente em contacto com superfície do provete, enquanto que no aquecimento por radiação, a placa foi colocada com um afastamento de 2cm, como se pode verificar na figura 5.21.

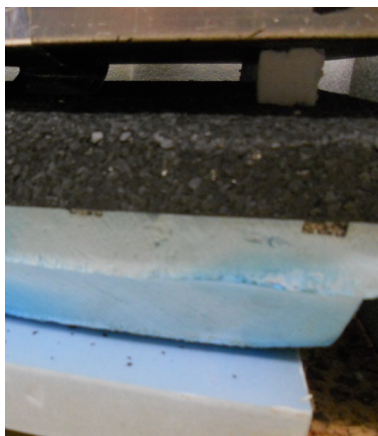


Fig. 5.21: Aquecimento dos provetes por radiação.

No entanto, como se verificará nos resultados obtidos, o método de aquecimento por radiação em laboratório será descartado. Este facto deve-se a ter sido produzido um aquecimento muito reduzido do provete, não permitindo dessa forma a detecção clara de anomalias.

Como foi mencionado no ponto 5.3.1, foi construído um suporte metálico para garantir a distância (campo de visão) e a perpendicularidade entre a câmara termográfica e a superfície do provete durante os ensaios. No entanto, o suporte não é fácil de transportar, o que dificulta a sua utilização *in situ*. Como seria de todo o interesse utilizar apenas a câmara de termografia para a realização das inspecções, procedeu-se à avaliação do erro associado ao ângulo de observação em laboratório. No ponto 4.3.5, foi referido que, para materiais não metais, a variação da emitância era quase nula para ângulos de observação entre os 0° e os 60°, com a normal à superfície do provete, ou seja, as temperaturas superficiais obtidas através da câmara também não variarão muito, pois dependem da radiação emitida. Por esse motivo, em laboratório foram realizadas medições das temperaturas superficiais ao longo do tempo com a câmara a 60° com a normal à superfície do provete, de forma a avaliar os erros associados à alteração do ângulo de observação. Para que se conseguisse colocar a câmara aproximadamente a 60° com a normal do provete foi utilizado um cabo extensível, que permitia a rotação da base de apoio, e um transferidor, como se representa na figura 5.22(a).



(a) Utilização de um transferidor para a medição do ângulo de 60° entre a normal à superfície e a posição da lente da câmara termográfica.

(b) Ângulo de observação da câmara a 60° com a normal à superfície do provete.

Fig. 5.22: Procedimento para o posicionamento da câmara termográfica a 60° com a normal à superfície do provete.

5.3.3 Ensaios *in situ* com anomalias controladas

Constituição dos provetes e colocação *in situ*

Os dois provetes utilizados nos ensaios exteriores, *a)* e *b)*, foram provetes previamente sujeitos a ensaios de resistência à sucção do vento, realizados na Unidade de Revestimentos de Coberturas (URC) do LNEC, como já tinha sido referido. Escolheu-se este tipo de provetes por apresentarem bastantes anomalias, resultantes do ensaio anterior, e retratarem muito aproximadamente uma aplicação à escala real. Assim, tornam possível a continuação do estudo realizado em laboratório.

Nestes ensaios o método da termografia realiza-se sobre provetes com anomalias controladas mas, ao contrário do estudo em laboratório, estes estão sujeitos a condições ambiente variáveis.

Os provetes apresentam dimensões de $1.98m \times 1.98m$ e são constituídos por uma estrutura resistente flexível em chapa metálica nervurada, por placas de isolamento térmico em lã de rocha e um revestimento de impermeabilização de camada dupla, fixado mecanicamente ao suporte (figura 5.23).

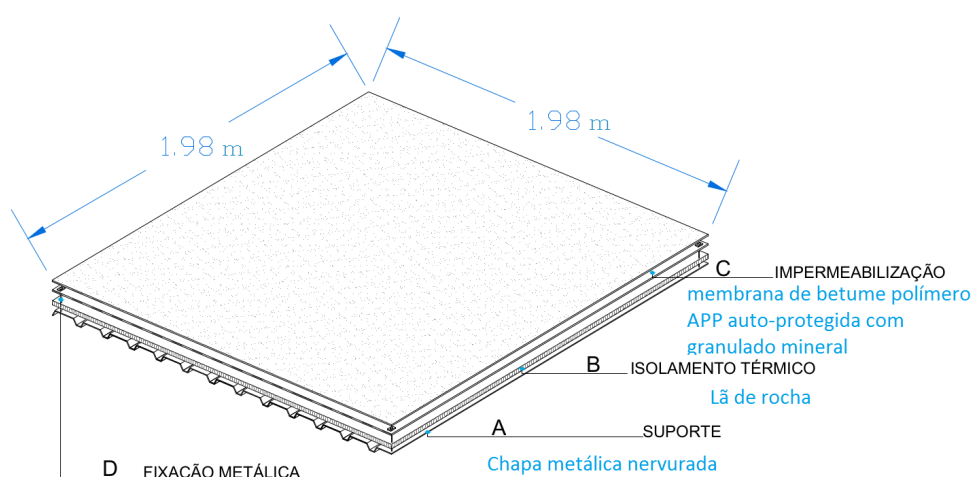


Fig. 5.23: Constituição dos provetes com anomalias controladas para ensaios no exterior.

Antes de se realizar o transporte dos provetes com o empilhador garantiu-se, através de observações antecipadas das zonas de sombra, que o local onde os provetes seriam colocados estaria sempre sob a acção da radiação solar, factor importante para garantir o aquecimento natural dos provetes a ensaiar.

Definição das grelhas

Depois de se testar a câmara termográfica verificou-se que a área efectivamente obtida através da imagem termográfica era de $0.645m \times 0.855m$. Por esse motivo, foi necessária a construção de uma grelha para cada um dos provetes, provete a) e provete b). Com a grelha definida passou a ser possível, no fim de cada ensaio, montar a imagem térmica total de cada provete, constituída pela junção de vários termogramas. A grelha obtida após algumas operações matemáticas básicas, tanto para o provete a) como o provete b), é apresentada na figura 5.24.

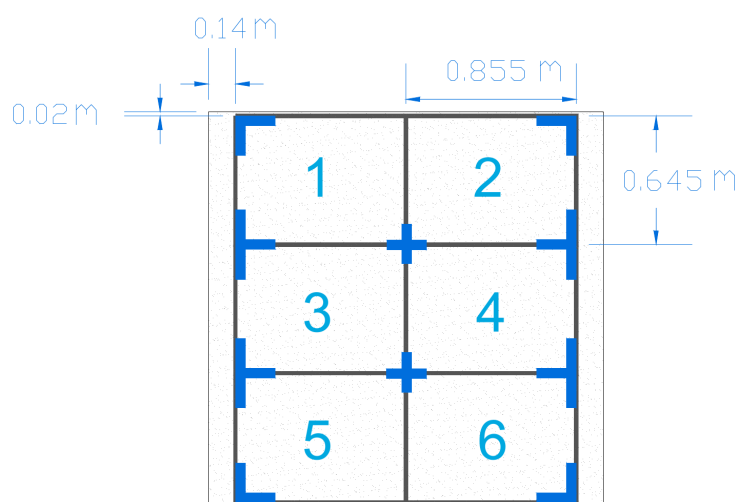


Fig. 5.24: Definição da grelha de medição para os provetes a ensaiar no exterior.

Nos limites de cada rectângulo da grelha traçada, como se representa na figura 5.24, foi colocada fita de alumínio autoadesiva para que esse mesmo rectângulo fosse identificável na câmara termográfica.

5.3.4 Avaliação de coberturas *in situ* em condições reais

Como se referiu no ponto 5.1, para se validar o método de termografia de infravermelhos para a detecção de anomalias em membranas de impermeabilização, desenvolvido em laboratório, foram inspeccionadas duas coberturas correspondentes a casos reais, para além dos ensaios que foram realizados no exterior. A localização dessas coberturas, assim como os procedimentos adoptados nas respectivas inspecções, são mencionados nos pontos seguintes.

Célula experimental C5

Um dos casos de estudo, para a validação do método estudado, foi a cobertura da célula experimental C5, localizada no campus do LNEC (figura 5.25). A cobertura da célula experimental é plana e de acessibilidade condicionada e apresenta o sistema de impermeabilização, constituído por membrana de betume polímero APP, à vista. Como existiam alguns problemas de infiltrações, visíveis no

interior através de manchas de humidade, foi utilizado o método estudado com o intuito de detectar principalmente a existência de água sob o revestimento de impermeabilização.

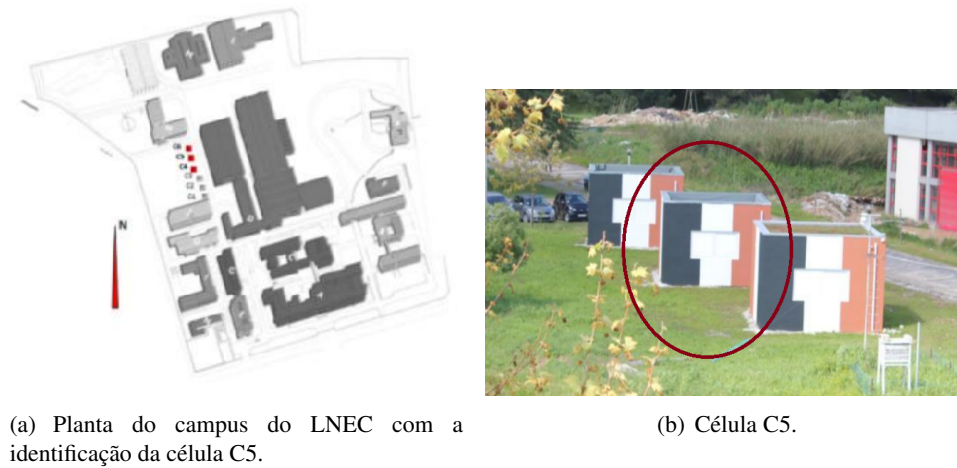


Fig. 5.25: Localização da célula C5.

Para a aplicação da termografia de infravermelhos na cobertura da célula foi ainda utilizado o suporte metálico, tal como nos ensaios anteriores. Assim, tanto a perpendicularidade como a distância entre a câmara termográfica e a superfície em análise foram mantidas.

O aquecimento da superfície, como se mencionou no ponto 5.3.1, foi realizado através do fluxo de calor imposto pelo sol ao longo do dia.

Tal como nos provetes utilizados nos ensaios no exterior, também foi necessário construir uma grelha que abrangesse toda a área da cobertura. Como essa área ainda era significativa, cerca de $17.98m^2$, a obtenção de uma imagem termográfica total sem a construção de uma grelha do género tornava-se quase impossível. A grelha obtida para a cobertura da célula C5 é apresentada na figura 5.26.

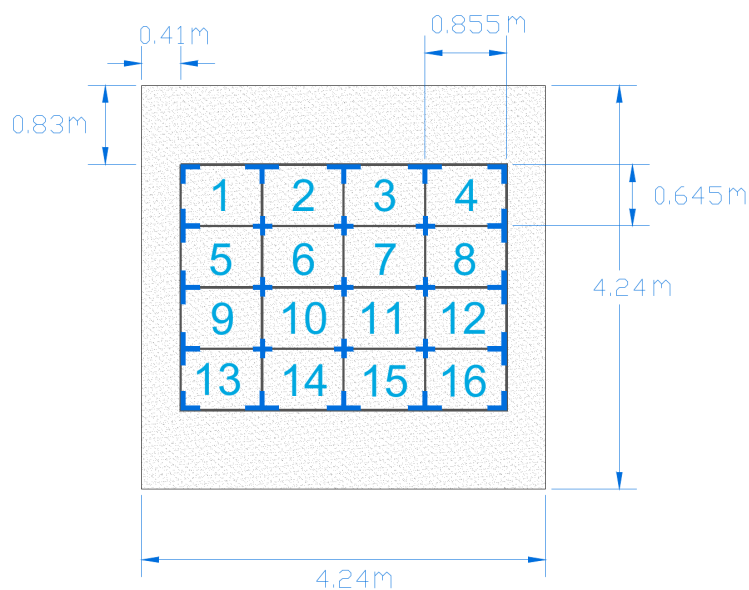


Fig. 5.26: Definição da grelha de medição para a cobertura da célula C5.

Na célula C5, também foi colocada fita de alumínio autoadesiva nos limites de cada rectângulo da grelha (figura 5.26). Como já se tinha explicado no ponto referente aos ensaios *in situ* com anomalias controladas (5.3.3); esta fita tem como finalidade a detecção de cada rectângulo da grelha na imagem termográfica e, assim, facilitar a montagem dos vários termogramas para se obter uma imagem termográfica de toda a cobertura. A colocação dessa fita adesiva *in situ* é visível na figura 5.27.

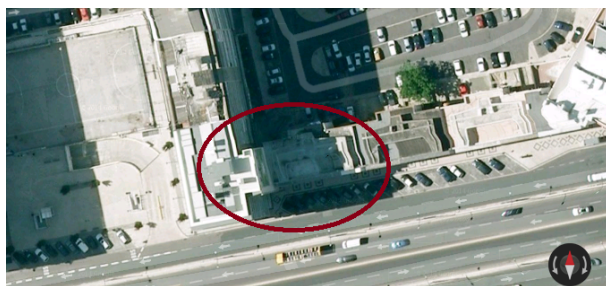


Fig. 5.27: Colocação da fita de alumínio adesiva para delimitação dos rectângulos da grelha.

Os registos termográficos, neste caso de estudo, foram realizados durante a tarde (período de aquecimento) e após o pôr do sol (período de arrefecimento).

Edifício de habitação plurifamiliar

O segundo caso de estudo para aplicação do método de ensaio não destrutivo foi um edifício de habitação plurifamiliar na Avenida dos Estados Unidos da América, em Lisboa. A localização exacta do edifício é apresentada na figura 5.28.



(a) Localização do edifício de habitação plurifamiliar em planta.



(b) Fachada principal do edifício.

Fig. 5.28: Localização do edifício de habitação plurifamiliar utilizado como caso de estudo [CITIES, 2014].

A cobertura do edifício é plana, acessível a pessoas e apresenta o sistema de impermeabilização à vista. Tal como a cobertura da célula C5, a cobertura em terraço do edifício de habitação também apresentava problemas de infiltrações. Por esse motivo, o objectivo principal desta inspecção foi a detecção de água sob o revestimento de impermeabilização.

No entanto, a inspecção deste edifício esteve condicionada apenas ao período da manhã, devido à sua localização. Como se pode observar na figura 5.28(a), este encontra-se junto a um edifício mais alto que lhe provoca sombra no período da tarde, ou seja, durante esse período não existe um diferencial de temperatura significativo, para que possam ser detectadas as anomalias através da câmara termográfica.

Neste caso de estudo, assim como acontecerá na maioria das inspecções utilizando o método desenvolvido, não foi possível o transporte do suporte metálico, quer pelas suas dimensões, quer pela dificuldade de transporte. Assim, a inspecção foi realizada de acordo com o procedimento descrito no ponto 5.3.2, garantido sempre um ângulo de 60° entre a normal à superfície da cobertura e a câmara termográfica.

Foram ainda planeadas mais três inspecções a edifícios com problemas de infiltrações; no entanto, não foi possível efectuá-las devido a condições atmosféricas desfavoráveis (ocorrência de precipitação) que ocorreram durante largas semanas.

Capítulo 6

Apresentação e análise de resultados

6.1 Caracterização das propriedades radiativas do revestimento de impermeabilização

A maior reflectância obtida com a aplicação das tintas reflectantes, para além de contribuir ao nível do desempenho térmico da cobertura, pode trazer vantagens relativamente à durabilidade do revestimento de impermeabilização. A aplicação de tintas com elevada reflectância nas membranas em estudo permite uma diminuição das temperaturas superficiais contribuindo, desta forma, para a manutenção das capacidades resistente e de deformação do revestimento de impermeabilização.

6.1.1 Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

Ao obter a reflectância direccional das amostras de membranas de impermeabilização através do luminómetro CS-100 (ver ponto 5.2.3), verifica-se que quando se aplica uma tinta reflectante branca sobre suportes mais escuros, como é o exemplo da membrana de betume polímero auto-protégida com granulado mineral cinzento (XC/BR), a reflectância da amostra tem uma melhoria bastante significativa, como seria de esperar. Essa conclusão pode ser retirada por comparação entre a figura 6.1 e a figura 6.2.

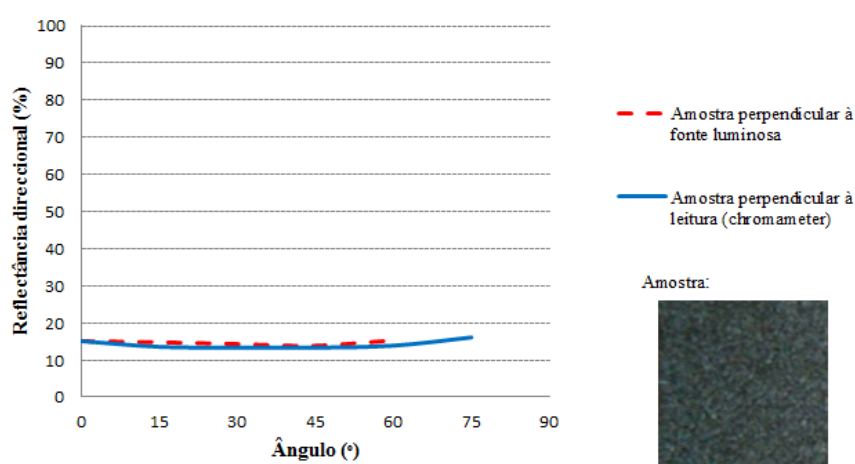


Fig. 6.1: Reflectância direccional obtida para a amostra XC perpendicular à fonte luminosa e perpendicular à leitura.

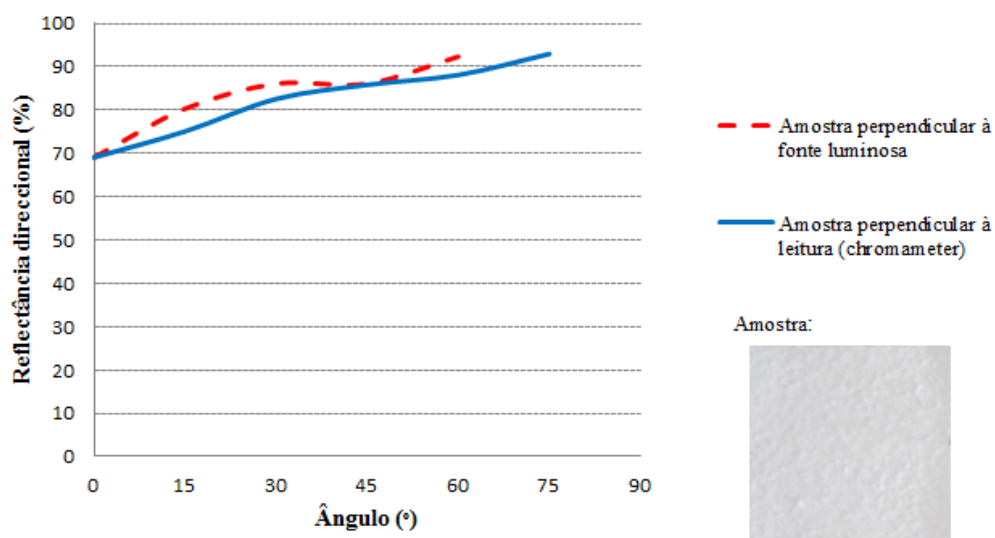


Fig. 6.2: Reflectância direccional obtida para a amostra XC/BR perpendicular à fonte luminosa e perpendicular à leitura.

Verifica-se também que, com a aplicação da tinta reflectante, o material passa a ter uma componente especular maior, ou seja, passa a ser considerado um material angularmente selectivo. Esta mudança de comportamento pode ser visualizada comparando os gráficos das figuras 6.1 e 6.2.

Na figura 6.1 é possível observar que a reflectância direccional varia muito pouco com a variação do ângulo, quer de leitura, quer de incidência da fonte luminosa. Por esse motivo, o material apresenta um comportamento típico de uma superfície difusa, pois reflecte a radiação de forma equitativa em todas as direcções [HENRIQUES, 2011]. No entanto, na figura 6.2 o valor da reflectância direccional da amostra da membrana com a tinta reflectante aplicada aumenta com o ângulo, quer seja o ângulo de leitura, quer o ângulo de posicionamento da fonte luminosa. Deste modo, conclui-se que quanto maior for o ângulo entre a leitura e a fonte luminosa, maior será a reflectância direccional da amostra. A figura 6.3 sintetiza as ilações retiradas, evidenciando-se o comportamento demonstrado por uma superfície difusa e por uma superfície composta, respectivamente, das amostras XC e XC/BR.

Relativamente ao método adoptado no ensaio; quanto à variação da fonte luminosa, mantendo a leitura fixa, ou à variação da leitura, mantendo a fonte luminosa fixa, verifica-se que o valor da reflectância da amostra é relativamente maior quando se opta pelo método de fixação da posição da fonte luminosa (figuras 6.1 e 6.2). Este facto deve-se à maior quantidade de luz que incide sobre a superfície da amostra, pois quando o fluxo luminoso é paralelo ao vector normal a essa superfície a iluminância da amostra é máxima. O conceito de iluminância pode ser descrito como a quantidade de luz que incide na superfície por unidade de área [*em lumen/m² ou lux*].

6.1. Caracterização das propriedades radiativas do revestimento de impermeabilização

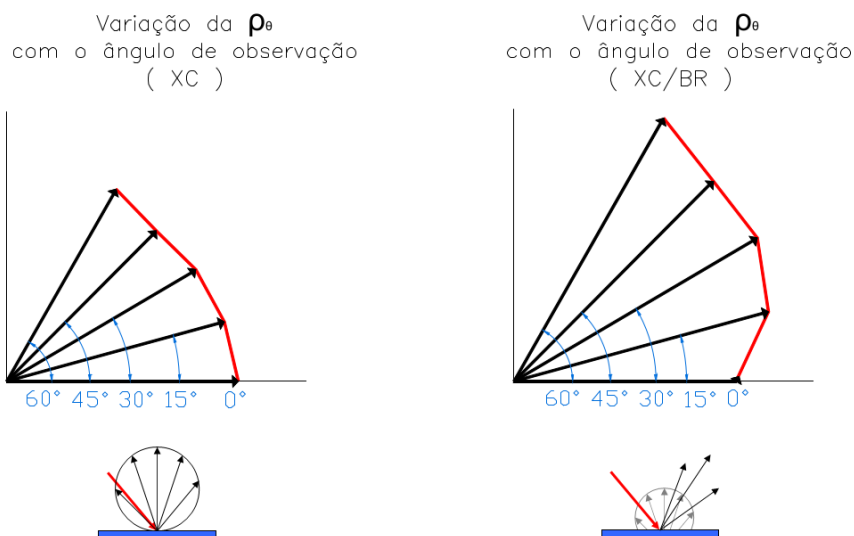


Fig. 6.3: Esquema representativo da reflectância direccional das amostras XC e XB/BR em função do ângulo de incidência.

Ao contrário da maioria das amostras ensaiadas, a amostra ASF apresentou comportamento mais especular para ângulos mais fechados, ou seja, a reflectância direccional dessa amostra é tanto maior, quanto menor for o ângulo entre o ponto de leitura e a fonte luminosa (figura 6.4).

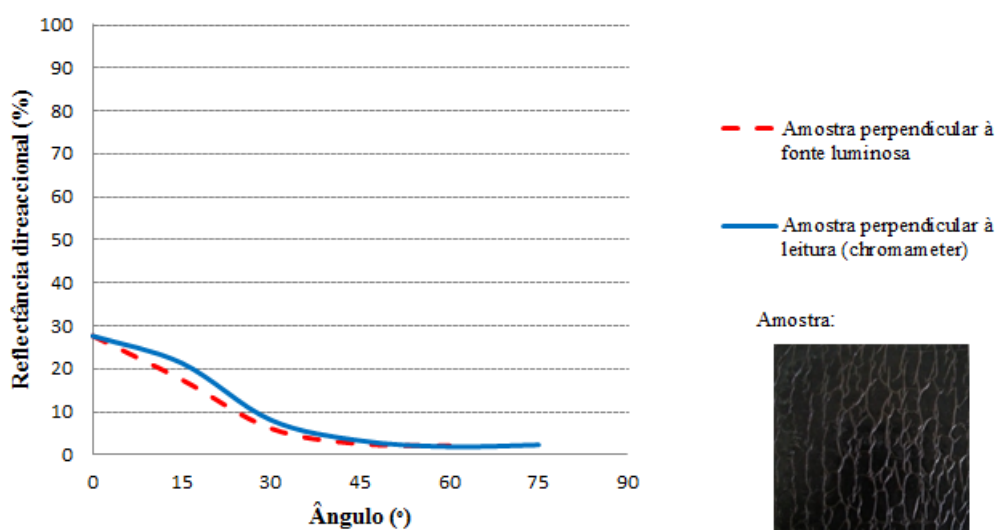


Fig. 6.4: Variação da reflectância direccional da amostra de membrana de betume polímero com filme de polietileno na face superior e inferior.

Para se compreender o porquê deste comportamento simulou-se, de um modo simplificado, o ensaio realizado em laboratório (figura 6.5). Devido à presença do filme de polietileno na parte superior da membrana, quando a amostra se encontra perpendicular à fonte luminosa e à leitura, esta perde a sua cor natural (preto) e fica com um tom amarelado (figura 6.5(a)). Essa cor aparente dá origem a maiores valores de reflectância direccional para ângulos mais fechados, exemplificando-se neste caso o ângulo de

0°. Quando o ângulo entre o ponto de leitura e a fonte luminosa começa a ficar mais aberto, mostrando-se como exemplo o ângulo de 45° na figura 6.5(b), a amostra começa a apresentar a sua cor preta natural. Sendo essa cor mais escura, absorve grande parte da energia proveniente da fonte luminosa e, como consequência, a componente reflectida diminui.

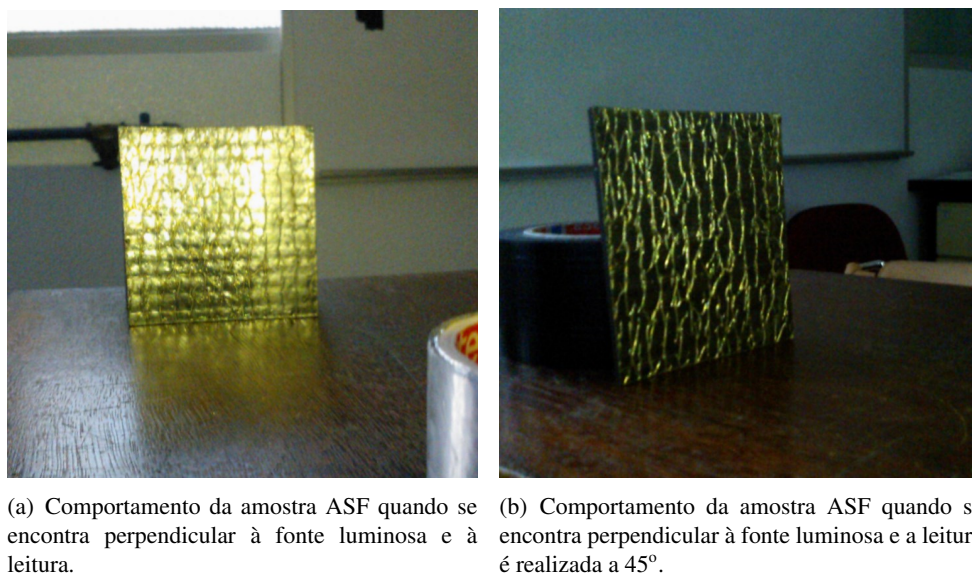


Fig. 6.5: Simulação do comportamento da amostra ASF com a variação do ângulo de leitura.

Em todos os ensaios realizados verificou-se que, na região do visível, a aplicação da tinta reflectante de cor telha é prejudicial, em termos de reflectância, quando aplicada em suportes mais claros, ao contrário da cor branca que permite sempre uma melhoria significativa dessa propriedade (figura 6.6).

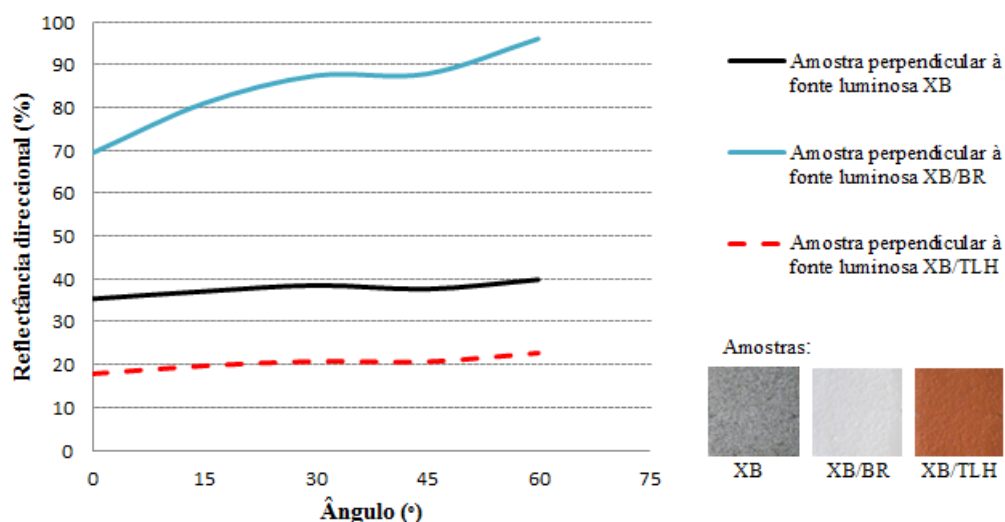


Fig. 6.6: Diferenças entre a variação da reflectância direccional da amostra XB simples e com tinta reflectante de cor branca ou cor telha.

No que diz respeito ao granulado mineral (XC, XB e XEB), utilizado como protecção leve nas membranas de betume polímero, este também pode influenciar, de forma significativa, a reflectância

das amostras (figura 6.7). A membrana auto-protégida com granulado mineral de cor mais escura (XC) apresenta valores de reflectância mais baixos. Este comportamento deve-se, como já foi explicado anteriormente, ao facto das cores mais escuras absorverem mais energia da fonte luminosa e, assim, reflectirem menos. A alteração do tom da cor entre fabricantes, com maior ou menor intensidade da coloração, também pode ter um efeito significativo na reflectância da amostra, como se pode visualizar na figura 6.7. Tanto a amostra XB como a amostra XEB dizem respeito a membranas de betume polímero auto-protégidas com granulado mineral de cor branca mas, após a análise do gráfico, é evidente que a amostra XEB apresenta valores de reflectância maiores.

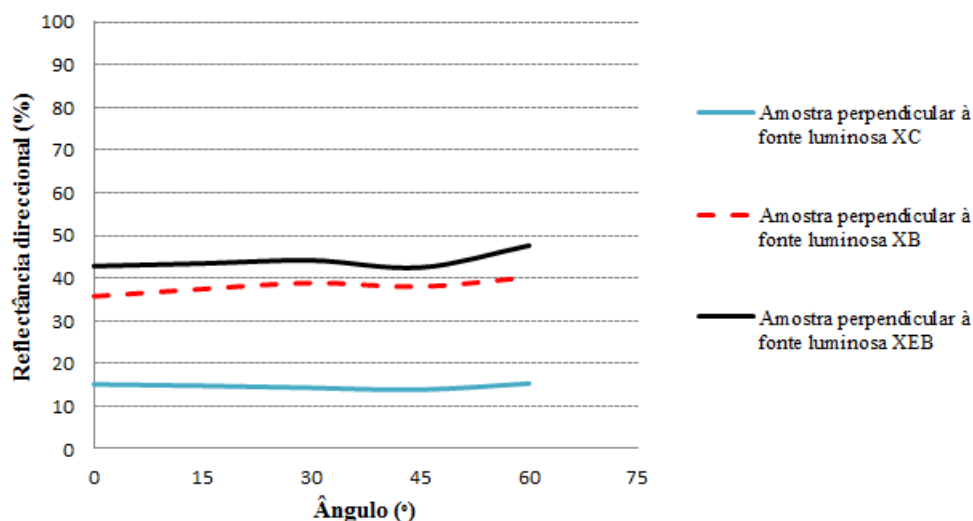


Fig. 6.7: Influência da cor do granulado mineral utilizado como protecção leve na reflectância direccional da amostra.

Como foi referido no ponto 5.2.2, foram preparadas mais quatro amostras onde houve aplicação de primário de cor branca antes da tinta reflectante, cor branca ou cor telha. Observando as figuras 6.8 e 6.9, verifica-se que a aplicação prévia do primário permite uma melhoria mais significativa da reflectância direccional, apenas nos casos em que é aplicada tinta reflectante de cor branca. Neste caso, ao aplicar o primário previamente na superfície da amostra este funciona como uma demão adicional. Desta forma, é possível ocultar mais facilmente a cor inicial do suporte, que era mais escura, e a reflectância direccional da amostra de XC/BR aumenta. Já no caso da cor telha, a aplicação do primário não representa grande influência em termos de reflectância direccional (figura 6.9), pois como a tinta reflectante é mais escura, apresenta maior capacidade para cobrir a cor inicial do suporte, tenha ele a cor cinzenta inicial, ou uma superfície mais clara devido à aplicação do primário.

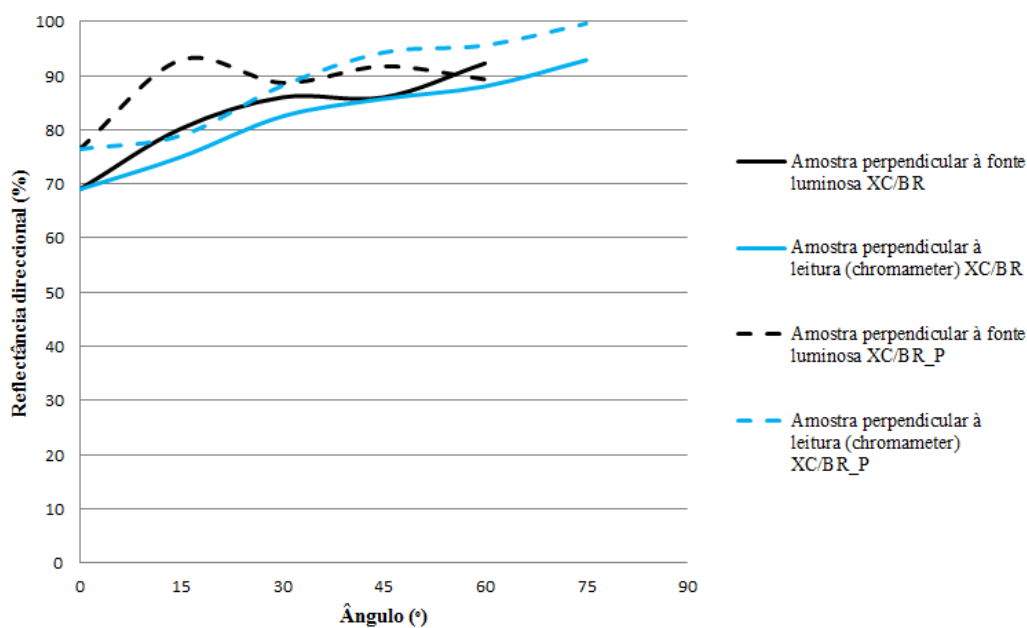


Fig. 6.8: Influência da aplicação de primário na reflectância direccional da amostra de XC/BR.

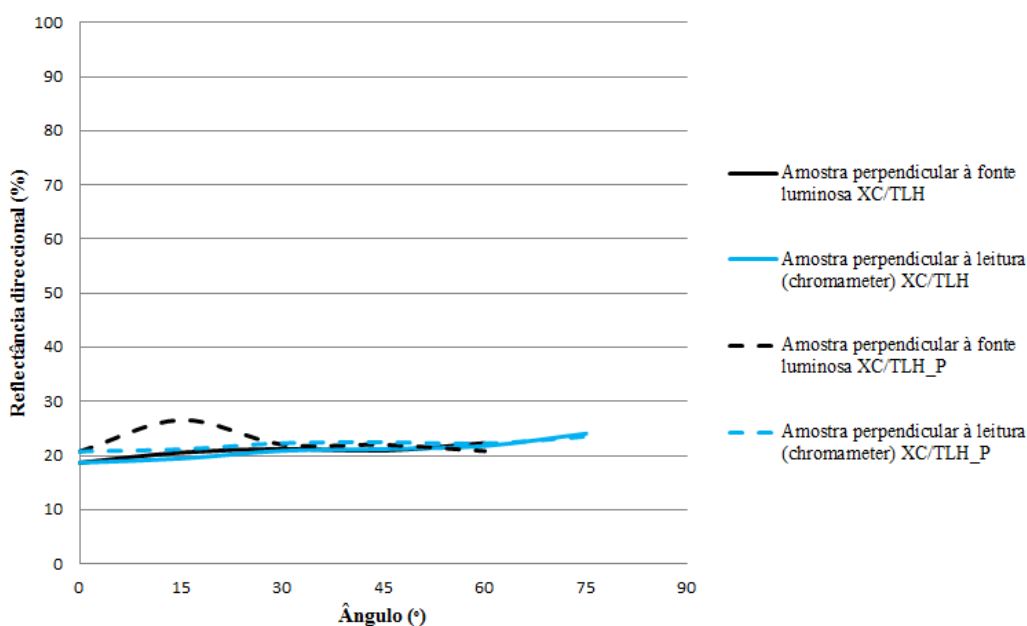


Fig. 6.9: Influência da aplicação de primário na reflectância direccional das amostras de XC/TLH.

Salienta-se que apesar de ter sido avaliado o comportamentos de todas as amostras definidas neste estudo (ver ponto 5.2.2), não são apresentados todos os resultados neste ponto. Este facto deve-se à repetição do comportamento entre vários tipos de amostras, considerando-se não haver necessidade de mencionar a informação ao longo do texto. No entanto, os gráficos obtidos para as restantes amostras são todos apresentados no Anexo B.1.

6.1.2 Reflectância total

Esfera integradora LMT RT 500 (visível)

A tinta reflectante mais eficaz, em termos de reflectância total, é a tinta com coloração branca, como se pode observar no gráfico da figura 6.10, independentemente da cor do suporte. Ao aplicar este tipo de tinta sobre as amostras de membranas betuminosas (XC/BR, XB/BR, XEB/BR e ASF/BR) a reflectância encontra-se na ordem dos 85%. Obtém-se desta forma o comportamento esperado, na região do visível, comportamento esse semelhante ao obtido no ensaio anterior (ponto 6.1.1), apesar de nesse ensaio se ter analisado a reflectância direccionada. Nesta gama de radiação electromagnética, as tintas apresentam-se mais ou menos eficientes pela sua cor, ou seja, quanto mais clara for a tinta, maior vai ser o valor de reflectância da amostra onde esta é aplicada.

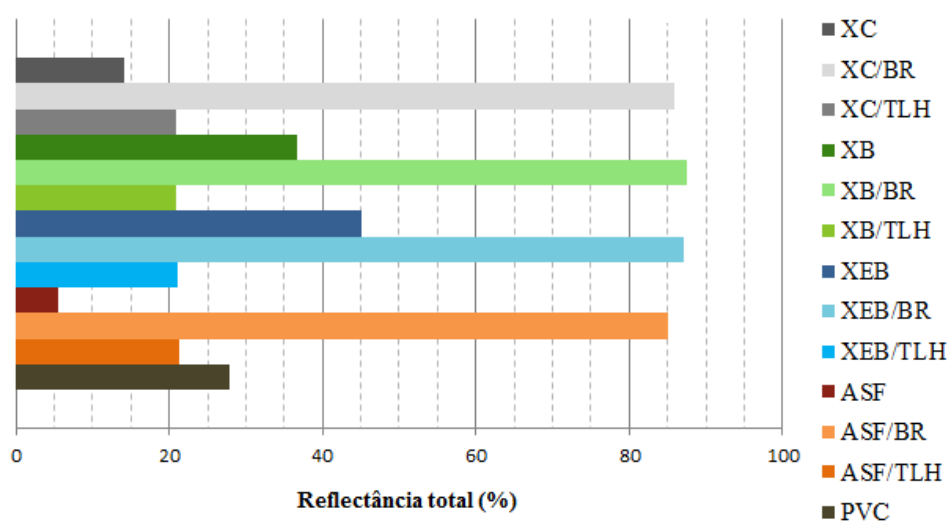


Fig. 6.10: Influência da cor da tinta reflectante aplicada na reflectância total das amostras.

A cor inicial do suporte, quando existe a aplicação de tinta de cor telha, não apresenta qualquer influência no valor da reflectância total após a superfície estar pintada (figura 6.11). No entanto, no caso em que há aplicação de tinta de cor branca, há uma ligeira influência dos suportes de cor mais escura, como o asfalto (ASF/BR) e o granulado mineral de cor cinzenta (XC/BR) (figura 6.12), como já foi referido no ponto anterior. Obtém-se este resultado porque ao aplicar uma tinta de cor mais escura esta consegue cobrir, com grande facilidade, toda a superfície, não deixando indícios da cor inicial do suporte. Já com a aplicação da tinta de cor mais clara, cor branca, e respeitando o mesmo número de demãos, existe uma maior dificuldade em revestir toda a superfície e, dessa forma, ficam alguns vestígios da cor mais escura inicial, diminuindo o valor da reflectância em relação às amostras com suporte de cor mais clara.

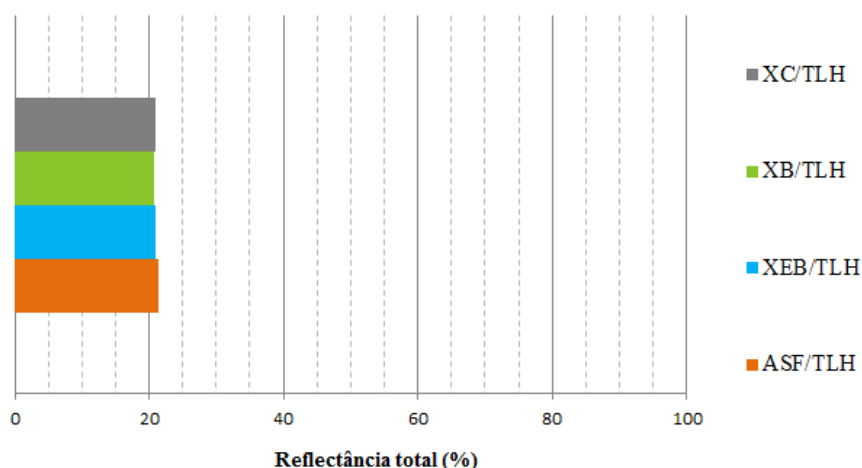


Fig. 6.11: Variação da reflectância total ao aplicar a tinta reflectante de cor telha sobre vários tipos de suportes.

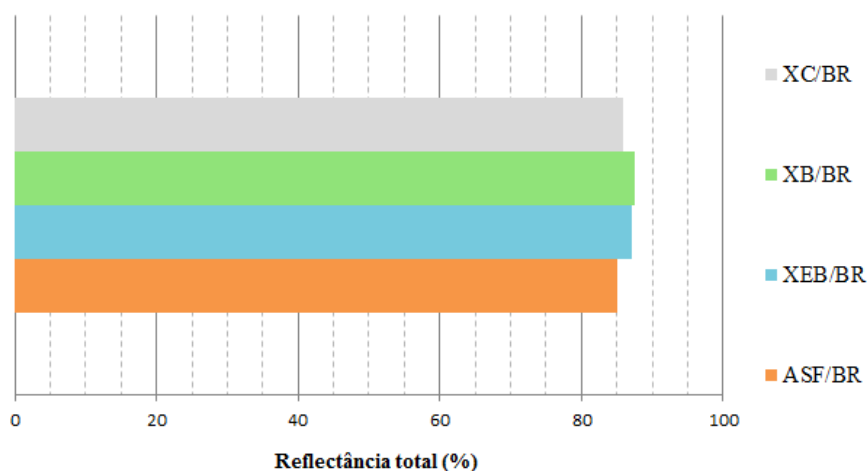


Fig. 6.12: Variação da reflectância total ao aplicar a tinta reflectante de cor branca sobre vários tipos de suportes.

A coloração do próprio material influencia consideravelmente a reflectância da membrana, como já se tinha observado no ponto 6.1.1. Na figura 6.13 apresenta-se a reflectância total para as amostras com xisto de diferentes colorações (XC, XB e XEB), onde se verifica que o xisto com coloração branca (XB e XEB) apresenta um valor de reflectância superior ao da membrana autoprottegida com xisto cinzento (XC), como seria de esperar. A variação no tom da coloração, que varia de fabricante para fabricante, também provoca alterações de reflectância notáveis. Ao analisar o gráfico da figura 6.13 podemos constatar esse facto através da comparação dos valores obtidos para a amostra XB e XEB, ambas de cor branca. Este facto comprova que a adopção de cores mais claras traz sempre benefícios para a habitação no que diz respeito ao desempenho térmico da cobertura na estação de arrefecimento. Assim, ao escolher revestimentos com maior reflectância obtêm-se temperaturas mais baixas no interior da habitação no Verão, pois há uma diminuição substancial dos ganhos térmicos através da envolvente opaca exterior. Na estação de aquecimento (Inverno) a elevada reflectância do revestimento continua a diminuir os ganhos térmicos e a temperatura do interior da habitação apresentando, por esse motivo, um pior desempenho. No entanto, Costa (sd) verificou que o balanço anual do consumo eléctrico (para

temperatura constante) é positivo, ou seja, o que é poupado no Verão em termos de consumo eléctrico acaba por compensar os gastos que se efectuam no período de aquecimento.

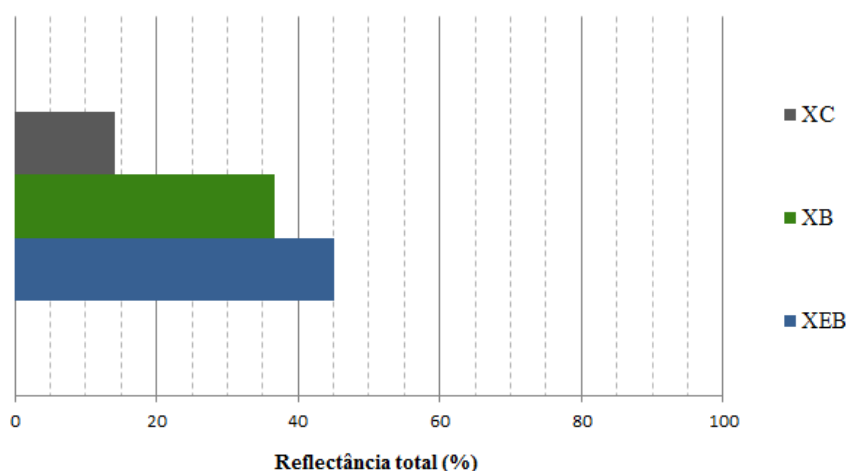


Fig. 6.13: Variação da reflectância total com a cor do granulado mineral das membranas de betume polímero.

A aplicação da tinta reflectante de cor telha só se torna vantajosa em termos de reflectância total quando a cor da superfície da membrana é mais escura, como já tinha sido concluído no ensaio anterior (ver ponto 6.1.1). No caso da membrana apresentar coloração clara (XB ou XEB), ao aplicar a tinta de cor telha, a eficiência da membrana em termos de reflectância é prejudicada, como se pode visualizar no gráfico da figura 6.14.

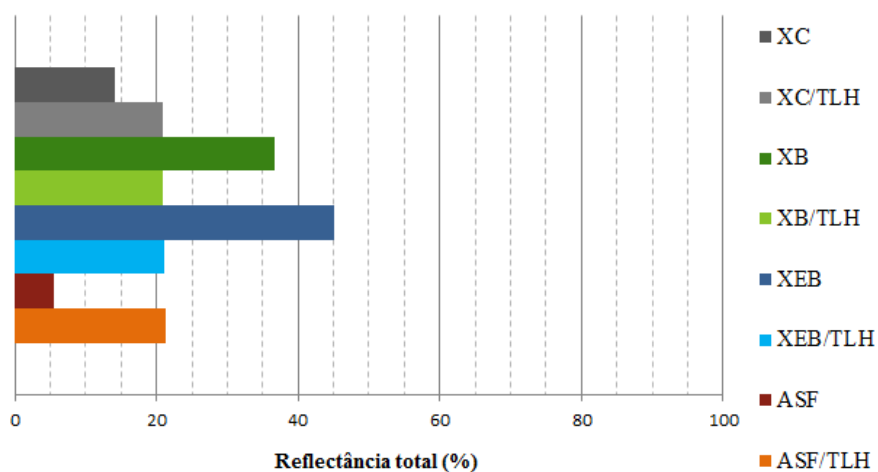


Fig. 6.14: Reflectância total de cada amostra antes e depois da aplicação de tinta reflectante de cor telha.

Relativamente à aplicação de primário antes da tinta reflectante, pode-se observar na figura 6.15 que a influência do primário é muito reduzida, para aplicação de ambas as cores reflectantes (branco e telha). No entanto, nota-se uma melhoria (pouco significativa) no caso da aplicação de tinta de cor branca, tal como foi referido e explicado no ponto 6.1.1. Ao pintar de cor telha o mesmo já não acontece, pois a reflectância total das amostras XC/TLH e XC/TLH_P é muito semelhante.

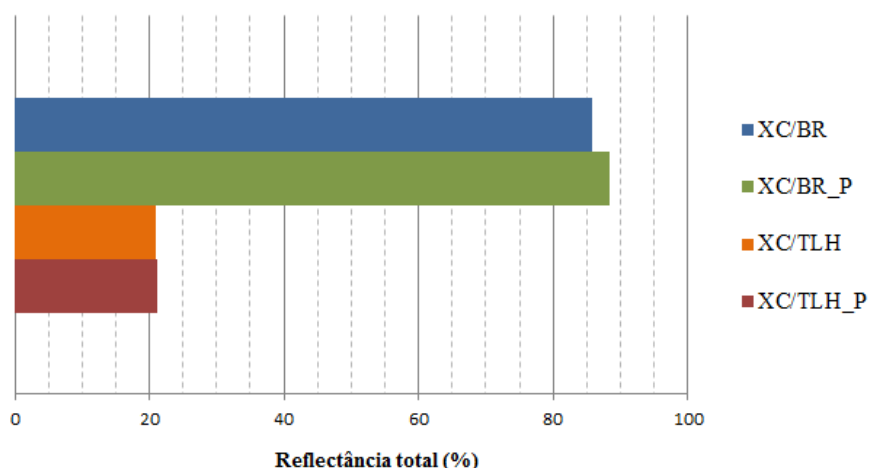


Fig. 6.15: Influência da aplicação de primário na reflectância total das amostras XC/BR e de XC/TLH.

Espectrofotômetro HITACHI modelo U-3300 (UV/ visível/ NIR)

As amostras com tintas reflectantes obtiveram melhores resultados de reflectância total (figura 6.16), tal como se concluiu no ensaio da esfera integradora LMT RT 500, apesar de se terem obtido apenas resultados na zona do visível. Os resultados obtidos no espectrofotômetro HITACHI permitiram, além de determinar a reflectância no visível, obter também os valores de reflectância numa gama estreita do NIR.

Analisando-se a figura 6.16 verifica-se que essa melhoria é muito maior quando há aplicação da tinta reflectante branca. Tendo em conta que o equipamento utilizado apenas permitiu analisar um pequeno intervalo do infravermelho próximo ($0.78\mu\text{m}$ a $0.9\mu\text{m}$), não é possível avaliar adequadamente o comportamento das tintas reflectantes na gama do infravermelho, onde seria esperado o melhor desempenho das referidas tintas (até cerca dos $2.5\mu\text{m}$).

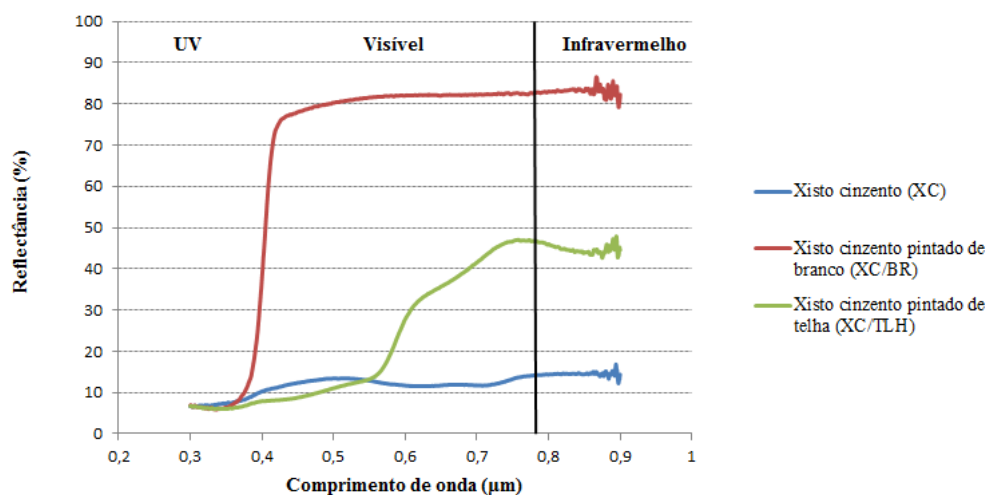


Fig. 6.16: Variação da reflectância total das amostras XC, XC/BR e XC/TLH com o comprimento de onda.

A eficiência da tinta de cor telha estudada, no que diz respeito à reflectância, é independente da cor do suporte, confirmando a análise realizada no ensaio da esfera integradora LMT RT 500. Apesar de

6.1. Caracterização das propriedades radiativas do revestimento de impermeabilização

se fazer variar a cor e a natureza do suporte a tinta reflectante de cor telha apresenta sempre o mesmo comportamento, como se pode verificar no gráfico da figura 6.17.

Relativamente aos valores obtidos na gama dos IV, verifica-se a mesma tendência observada na região do visível. No entanto, para maiores comprimentos de onda o valor de reflectância poderá alterar-se, pois o comportamento das tintas reflectantes apenas foi analisado até aos $0,9\mu m$.

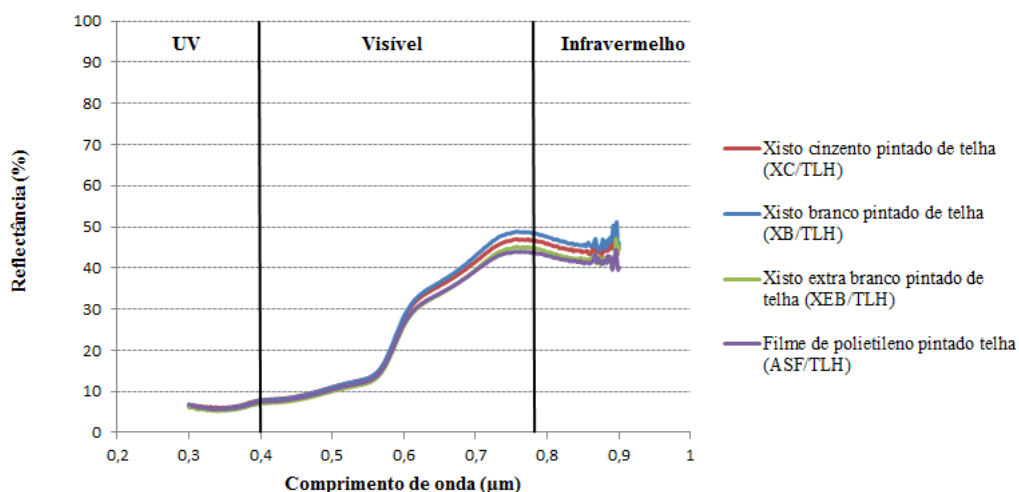


Fig. 6.17: Influência da cor inicial do suporte na reflectância total da amostra ao aplicar tinta reflectante de cor telha.

Os valores de reflectância total obtidos com provetes pintados de branco são, no entanto, influenciados pela cor inicial do suporte (figura 6.18), tal como já foi comprovado nos ensaios anteriores.

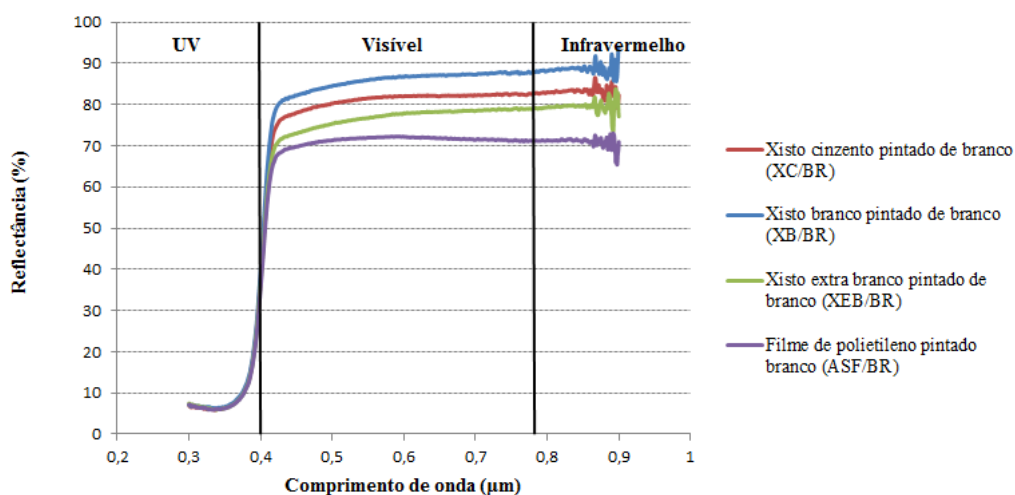


Fig. 6.18: Influência da cor inicial do suporte na reflectância total da amostra ao aplicar tinta reflectante de cor branca.

A coloração do xisto utilizado como protecção leve nas membranas de betume polímero (XC, XB e XEB) também influencia consideravelmente o valor da reflectância da amostra. Esta conclusão já tinha sido conseguida no ensaio da esfera integradora LMT RT 500 e no ensaio com o Luminómetro CS-100, apesar deste último ensaio determinar a reflectância direccional. Desta forma, a análise com o espectrofotómetro funciona como uma confirmação dos resultados já obtidos.

A membrana auto-protegida com xisto de cor branca apresenta um valor de reflectância muito superior à membrana auto-protegida com xisto de cor cinzenta (figura 6.19). A variação do tom de coloração entre fabricantes também influencia os resultados, como se pode verificar na figura referida, pois o xisto de cor extra branca é mais eficaz em termos de reflectância do que o xisto de cor branca.

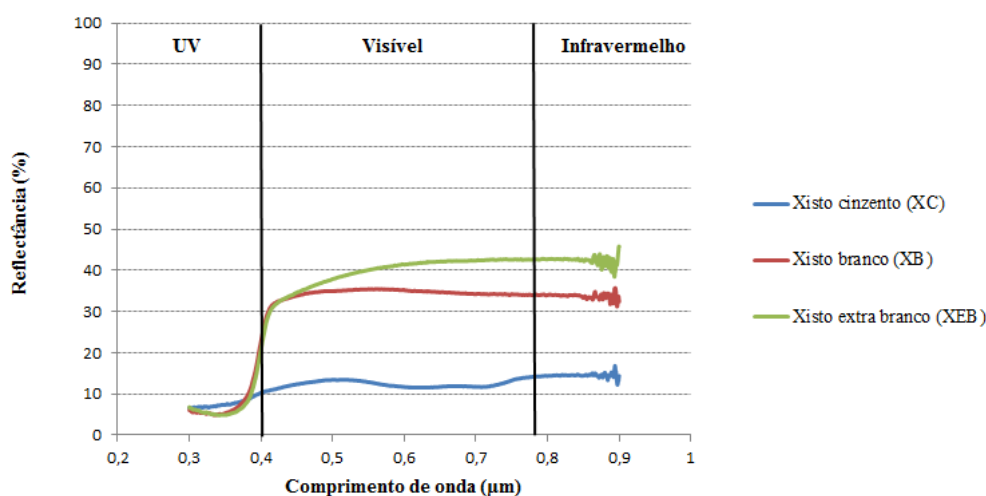


Fig. 6.19: Variação da reflectância total da amostra com o comprimento de onda de acordo com a cor do granulado mineral da membrana de betume polímero.

Ao observar a figura 6.20, verifica-se que a aplicação da tinta reflectante de cor telha apresenta maior eficácia nos valores de reflectância quando a cor do suporte é mais escura (amostra XC e ASF), tal como se mencionou em ensaios anteriores. Nos casos em que o suporte apresenta cor mais clara, como é o caso do xisto branco e extra branco, a cor telha prejudica o comportamento da membrana em termos de reflectância numa grande parte da zona do visível. Na região do infravermelho próximo a aplicação da tinta de cor telha permite sempre uma melhoria dos valores de reflectância das amostras, apesar dessa melhoria ser pouco significativa, ou quase nula, quando a tinta é aplicada numa membrana auto-protegida com cor extra branca. Este tipo de comportamento surge porque no visível a tinta de cor telha contribui para a reflectância apenas pela sua cor, ou seja, quando o suporte apresenta a cor mais clara (branco) ao aplicar-se uma cor mais escura (telha) está-se a diminuir a reflectância que a amostra tinha com a cor inicial. Quando os comprimentos de onda se aproximam da região do infravermelho próximo o que passa a influenciar a elevada reflectância à radiação solar são as características da própria tinta (tinta constituída por pigmentos reflectores da radiação IV) e não a cor. É por esse motivo que na região dos infravermelhos a tinta permite uma melhoria, em geral, do valor de reflectância de todas as amostras, independentemente da cor inicial do suporte (figura 6.20).

O facto das tintas reflectantes, geralmente, apresentarem maior reflectância na região dos infravermelhos, não torna este tipo de materiais menos eficazes face à radiação solar que incide na cobertura. Estas tintas acabam por funcionar na região espectral mais importante, pois a radiação infravermelha corresponde a cerca de 52% do espectro da radiação solar, como se mencionou no ponto 4.2.3.

6.1. Caracterização das propriedades radiativas do revestimento de impermeabilização

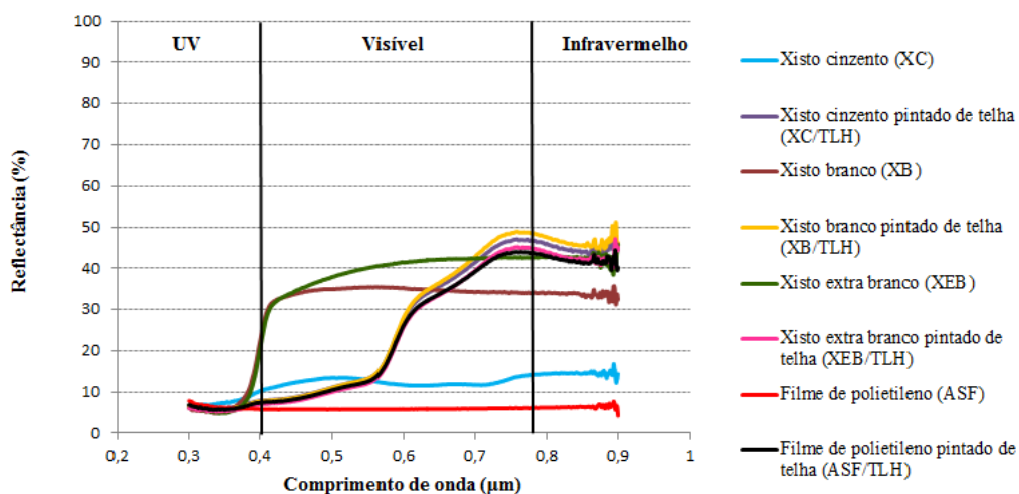


Fig. 6.20: Reflectância total de cada amostra com ou sem aplicação de tinta de cor telha.

Relativamente à aplicação do primário verifica-se que a aplicação deste antes da tinta reflectante não traz grandes benefícios em termos da melhoria da reflectância total da amostra, quer a tinta aplicada seja de cor branca ou de cor telha (figuras 6.21 e 6.22), tal como já tinha sido concluído em ensaios anteriores.

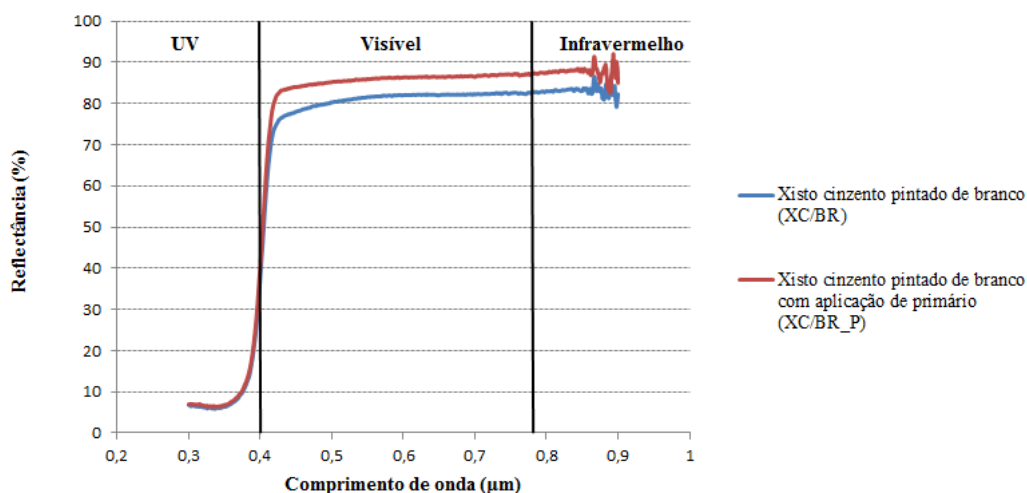


Fig. 6.21: Influência da aplicação de primário na reflectância total da amostra XC/BR.

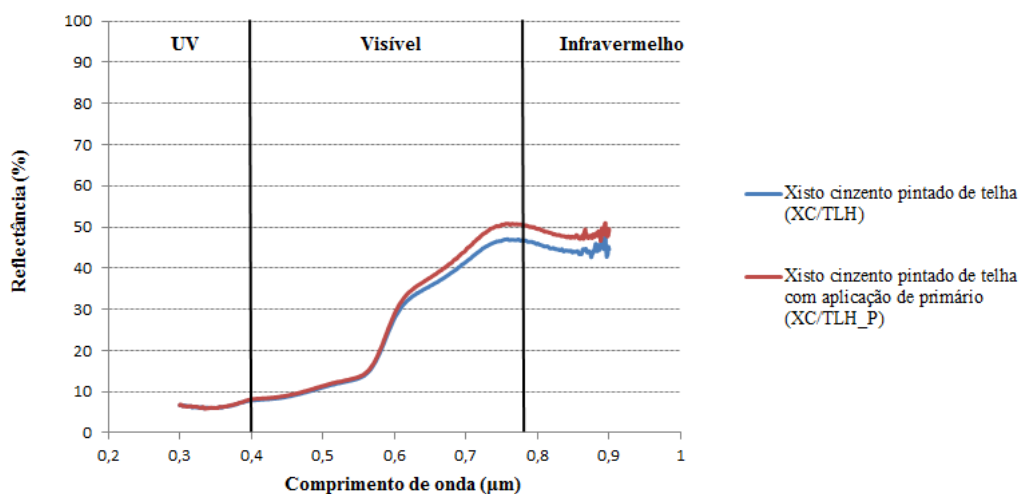


Fig. 6.22: Influência da aplicação de primário na reflectância total da amostra XC/TLH.

Comparação dos resultados obtidos pela esfera integradora LMT RT 500 e pelo espectrofotômetro HITACHI modelo U-3300 (visível)

Apesar de existir alguma variação em termos de reflectância na região do visível nos dois ensaios realizados, pode-se concluir que os valores obtidos para cada uma das amostras são, em geral, relativamente próximos (figura 6.23). Essa variação pode estar associada ao diferente funcionamento de cada equipamento e à forma como se procedeu ao tratamento de dados dos resultados obtidos. A esfera integradora LMT RT 500 fornece valores finais de reflectância para cada amostra, ao contrário do espectrofotômetro que fornece os dados sob a forma de espectro, ou seja, é necessário proceder à determinação da média de todos os valores entre os $0,4\mu\text{m}$ e os $0,78\mu\text{m}$ (região do visível), o que pode introduzir erros associados ao cálculo.

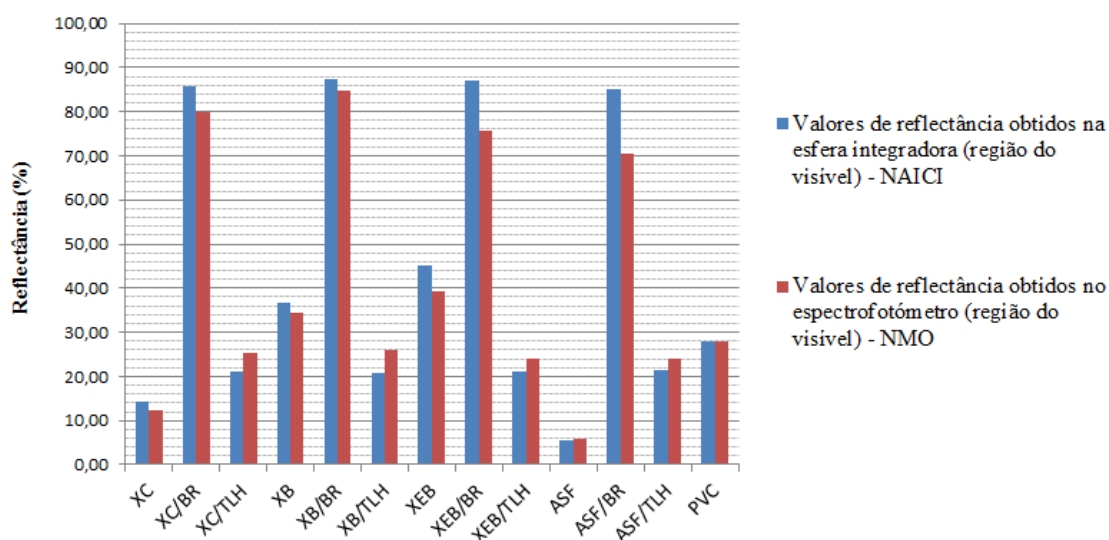


Fig. 6.23: Comparação dos valores de reflectância total obtidos no ensaio da esfera integradora LMT RT 500 com os obtidos no ensaio do espectrofotômetro HITACHI.

6.1.3 Emitância

Relativamente à determinação da emitância das amostras de betume polímero, auto-protegidas com granulado mineral (XC, XB e XEB) ou não (ASF), os resultados obtidos através do emissómetro model AE são apresentados no quadro 6.1.

Como se mencionou no ponto 5.2.3, neste ensaio apenas se determinou a emitância das membranas de betume polímero por serem os tipos de materiais que se encontram mais vulgarmente *in situ*, e sobre os quais é realizada a inspecção com a câmara termográfica no presente estudo.

Quadro 6.1: Valores de emitância das amostras de membranas de betume polímero obtidos através do emissómetro modelo AE.

Tipo de amostra	Emitância - ϵ [-]
XC	0.875
XB	0.85
ASF	0.82
XEB	0.835

Como os valores obtidos para as várias amostras são relativamente próximos, adoptou-se um valor de emitância de 0.85 para todos os ensaios e inspecções a realizar com a câmara termográfica ao longo deste estudo.

6.2 Detecção de anomalias por termografia de infravermelhos

6.2.1 Ensaios em laboratório

Mapeamento das anomalias

De forma a facilitar a detecção das anomalias através das imagens termográficas, obtidas pela câmara termográfica, realizou-se previamente um mapeamento das anomalias existentes no provete de pequenas dimensões ($0.60m \times 0.60m$) utilizado em laboratório. O mapeamento dessas anomalias é ilustrado na figura 6.24.



Fig. 6.24: Mapeamento das anomalias existentes no provete utilizado nos ensaios em laboratório.

Detecção de empolamentos

Tal como foi referido (ver ponto 5.3.1) para detectar anomalias - neste caso específico a presença de espaços de ar entre a membrana e o suporte - é necessário criar um fluxo térmico no provete em análise. Com esta finalidade, foi utilizada uma placa de aquecimento durante um período de 30 minutos, quer por condução quer por radiação.

i) Aquecimento por condução

Após se ter retirado a placa quente, que permitiu o aquecimento do provete, verifica-se que as zonas onde se encontram as bolsas de ar atingiram temperaturas mais elevadas do que a zona aderente envolvente, com cerca de 1.5°C de diferença, chegando mesmo em alguns pontos a atingir um diferencial de 2°C , como se pode observar na figura 6.25. Este método de aquecimento por contacto através de uma placa quente, descrito nos pontos 5.3.1 e 5.3.2, permite que se obtenham temperaturas na ordem dos 40°C à superfície do provete, o que leva a um diferencial significativo entre a temperatura da superfície e a temperatura ambiente (19.3°C), permitindo a visualização das anomalias através da câmara de termografia.

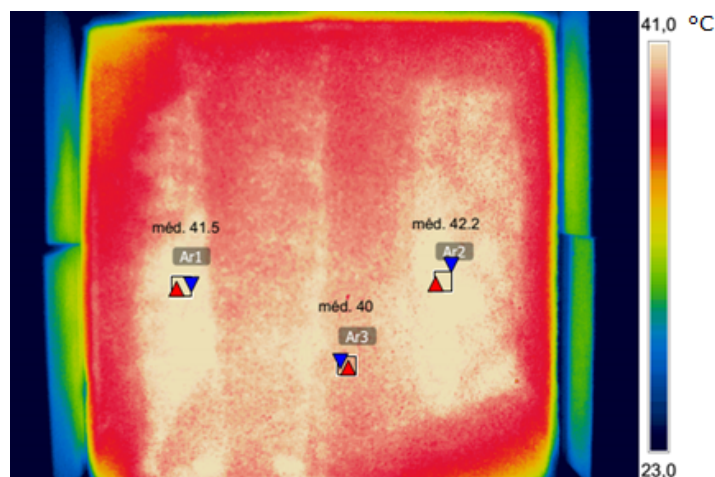


Fig. 6.25: Termograma obtido logo após a retirada da placa de aquecimento (0 minutos), aquecimento por condução.

Verificou-se ainda que após um período de arrefecimento, relativamente pequeno, os diferenciais de temperatura invertem-se, ou seja, as zonas aderentes passam a apresentar temperaturas superficiais mais elevadas e os empolamentos temperaturas superficiais mais baixas. Este facto está exemplificado na figura 6.26, onde é visível a distribuição de temperaturas obtida após um período de arrefecimento de 6 minutos. No entanto, este comportamento será descrito e explicado com mais pormenor ao longo desta secção de trabalho.

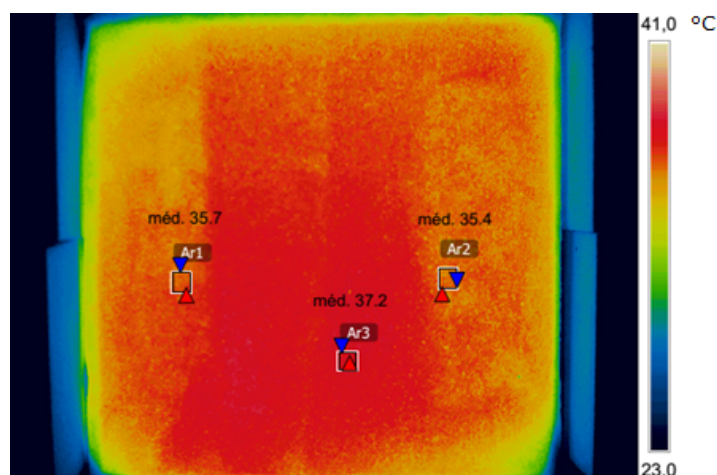


Fig. 6.26: Termograma obtido após um período de arrefecimento de 6 minutos, aquecimento por condução.

Com a ajuda do *software* FLIR foi possível marcar no termograma da figura 6.27 as linhas Li1 e Li2 e a isotérmica superior. As linhas definidas (Li1 e Li2) têm como objectivo a delimitação das zonas de empolamento, existentes no provete, enquanto que a isotérmica superior permite a observação das zonas de igual temperatura superficial com valor máximo. Ao observar a figura 6.27, é possível verificar que as manchas mais escuras, correspondentes à isotérmica superior, se encontram com mais intensidade dentro das zonas delimitadas, zonas coincidentes com os empolamentos. Esse comportamento é explicado pela existência de uma pequena lâmina de ar entre o revestimento de impermeabilização e o suporte. Essa lâmina de ar faz com que exista uma descontinuidade e, por esse motivo, a temperatura superficial dessa zona vai ser condicionada apenas pelo comportamento do ar aí existente. Como o ar apresenta uma inércia térmica fraca, a energia proveniente do aquecimento conseguiu alterar facilmente o seu estado termodinâmico, o que não acontece numa superfície que esteja aderente. Quando a superfície está aderente ao suporte, a inércia térmica é relativa a todos os elementos do provete (inércia mais elevada) tornando essa região mais resistente à alteração da temperatura quando sujeita a solicitações de energia térmica.

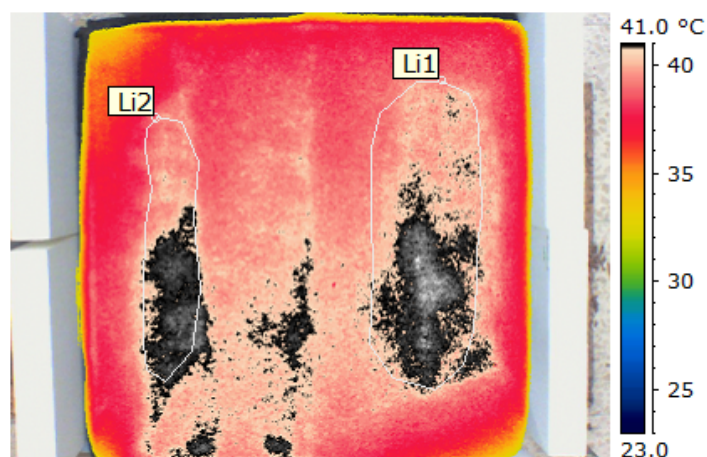


Fig. 6.27: Termograma com a delimitação das zonas dos empolamentos existentes, Li1 e Li2, e representação da isotérmica superior.

Após o aquecimento com a placa quente, foram realizadas termografias com um espaçamento temporal

de 2 minutos, de forma a acompanhar o comportamento das zonas onde se encontravam os espaços de ar. Como exemplo, são apresentadas as figuras 6.25 e 6.26, que representam a temperatura superficial do provete, logo após a retirada da placa de aquecimento, e a temperatura superficial ao fim de um período de arrefecimento de 6 minutos, respectivamente. Com a definição de alguns pontos em comum, nos vários termogramas, foi possível traçar o gráfico da figura 6.28, que mostra os diferenciais de temperatura entre as zonas de empolamento e as zonas aderentes ao longo do período de arrefecimento.

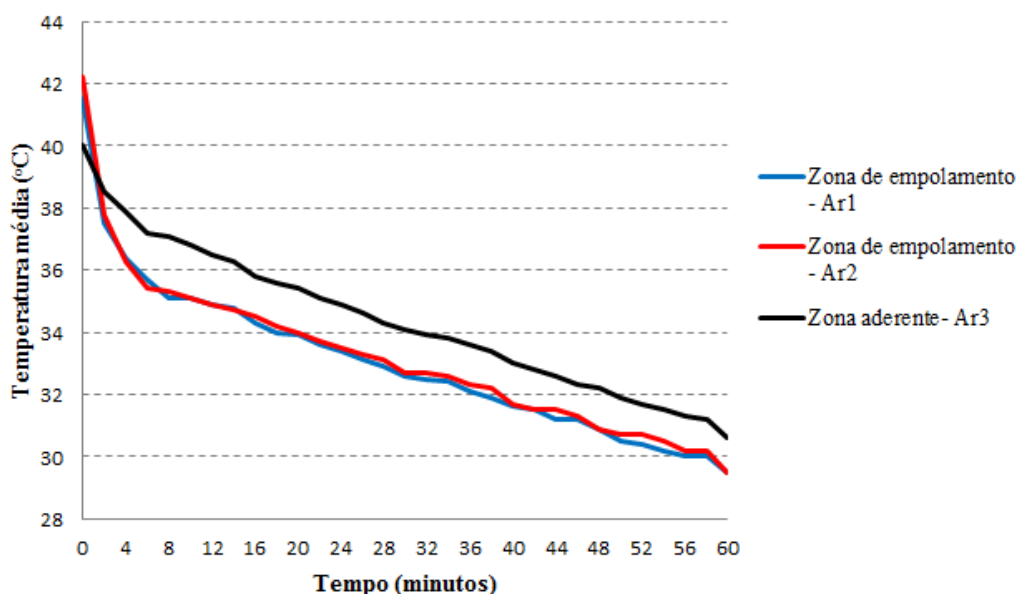


Fig. 6.28: Diferencial de temperaturas entre a zona aderente e a zona de empolamentos ao longo do período de arrefecimento (aquecimento por condução).

Ao observar a figura 6.28, verifica-se que, logo após a retirada da placa de aquecimento (0 minutos), as zonas de empolamento se encontram mais quentes que as zonas aderentes, como já se referiu. No entanto, o facto do período de registo das termografias ter sido relativamente pequeno (intervalos de 2 minutos), permitiu a visualização de uma inversão de temperaturas entre zonas com e sem aderência da membrana. Ao fim de 2 minutos, verifica-se que as zonas aderentes são aquelas que apresentam maior temperatura superficial pois, ao contrário dos empolamentos, como apresentam uma inércia térmica elevada não demoram muito mais tempo a libertar toda a energia que absorveram durante o aquecimento, arrefecendo assim mais lentamente.

Durante o período de arrefecimento, as zonas periféricas do provete arrefecem mais rapidamente que as zonas interiores, como se pode observar na figura 6.29. Apesar do cuidado ao vedar as partes laterais do provete com placas de poliestireno expandido moldado (EPS) (figura 6.30), de forma a evitar-se perdas térmicas para a envolvente, o equilíbrio térmico acaba por ocorrer mais rapidamente na periferia do que em zonas interiores.

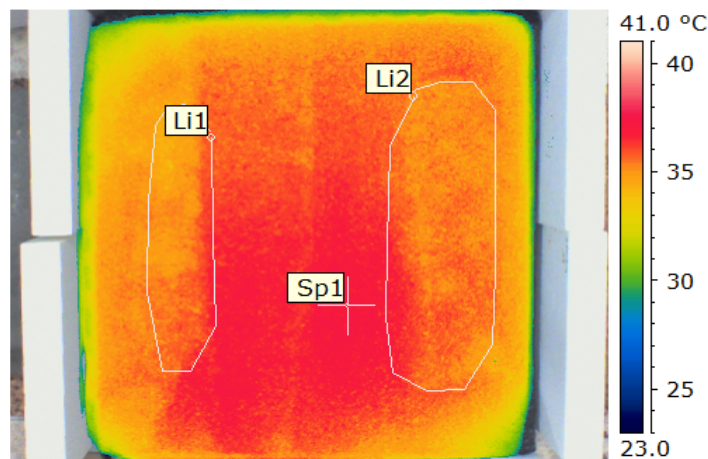


Fig. 6.29: Termograma obtido após um período de arrefecimento de 8 minutos, com delimitação das zonas dos empoamentos através das linhas 1 e 2 (aquecimento por condução).

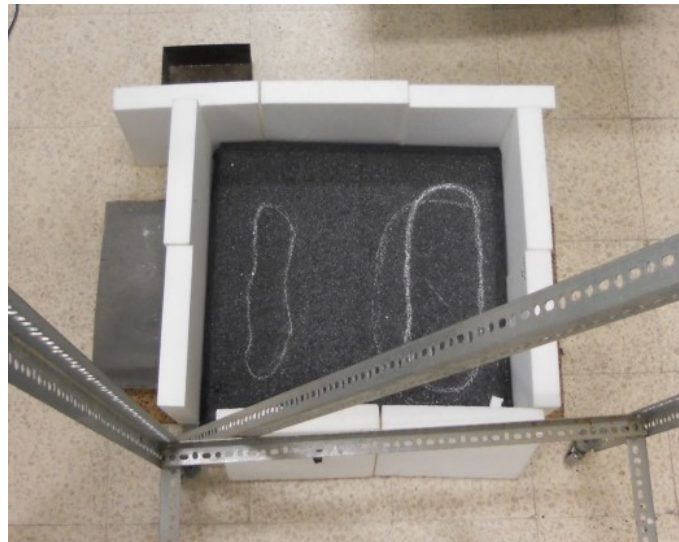


Fig. 6.30: Pormenor da aplicação de poliestireno expandido moldado (EPS) na envolvente do provete utilizado em laboratório.

A sequência completa dos termogramas obtidos ao longo do ensaio consta no Anexo B.4.1.

ii) Aquecimento por radiação

As temperaturas atingidas no aquecimento por radiação são muito menores do que as obtidas no aquecimento por condução, como é visível na figura 6.31. Os valores de temperaturas mais elevados no aquecimento por condução devem-se à aderência total da placa quente com a superfície do provete, não permitindo grandes perdas de calor para a envolvente. No aquecimento por radiação, ao contrário do método anterior, foi deixado um espaçamento de 2cm entre a placa quente e o provete, como se referiu no ponto 5.3.2, permitindo algumas perdas para o ambiente e diminuindo, dessa forma, a energia que chega ao provete.

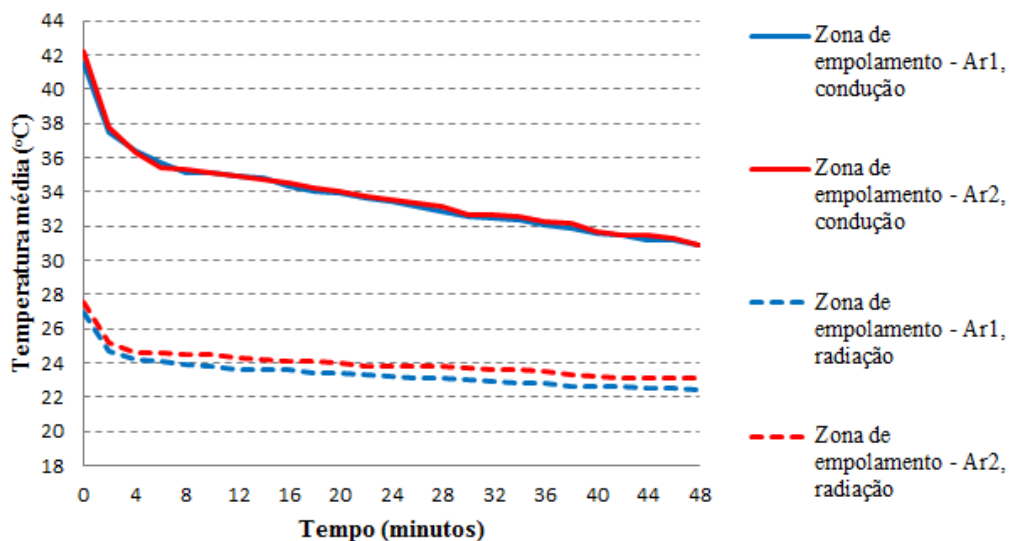


Fig. 6.31: Temperaturas atingidas através do aquecimento por condução e radiação ao longo do tempo.

Como se mencionou no ponto 4.3, é recomendado que o diferencial entre a temperatura do provete e a temperatura ambiente seja de pelo menos 10°C , de forma a identificar as anomalias com melhor nitidez. Esse diferencial só é significativo no método de aquecimento por condução, pois são atingidas temperaturas de aproximadamente 42°C , quando a temperatura ambiente na altura da medição era de 16.8°C . Como no aquecimento por radiação as temperaturas atingidas são muito mais baixas, cerca de 27.5°C , o diferencial de temperatura é muito reduzido. Todavia, foi possível identificar as anomalias num curto espaço de tempo, como se pode observar nas figuras 6.32 e 6.33.

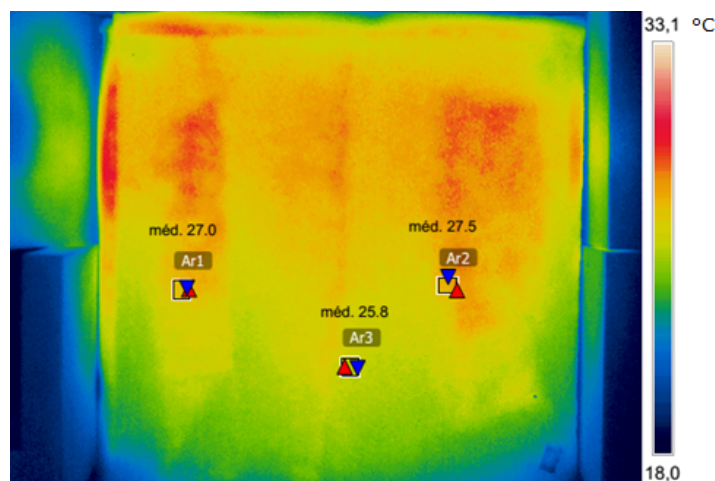


Fig. 6.32: Termograma obtido logo após a retirada da placa de aquecimento (0 minutos), aquecimento por radiação.

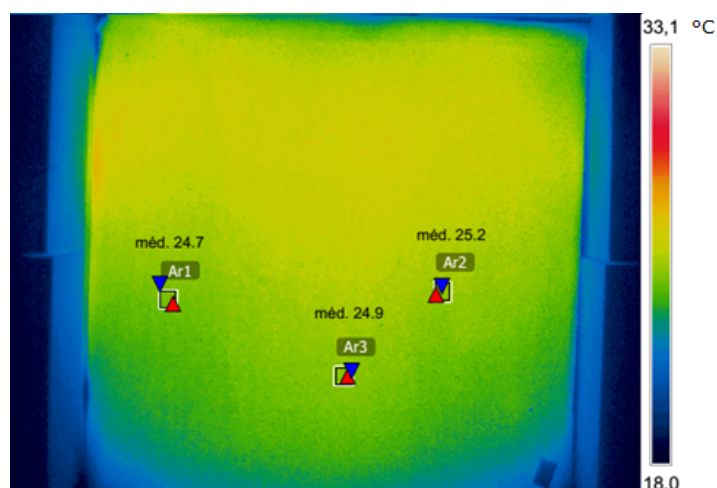


Fig. 6.33: Termograma obtido após um período de arrefecimento de 2 minutos, aquecimento por radiação.

Observando o gráfico da figura 6.34, no momento imediatamente após a retirada da placa de aquecimento é possível distinguir as zonas onde se encontram os empolamentos com temperatura superficial mais alta e as zonas aderentes mais frias. No entanto, ao longo do período de arrefecimento, verifica-se que as temperaturas do provete tendem a ficar muito próximas (a partir dos 4 minutos), sendo impossível a distinção entre zonas. Este comportamento ocorre de forma mais precoce neste tipo de aquecimento, comparando com o aquecimento por condução, pois as temperaturas atingidas são menores e o provete tende a atingir o equilíbrio térmico mais rapidamente.

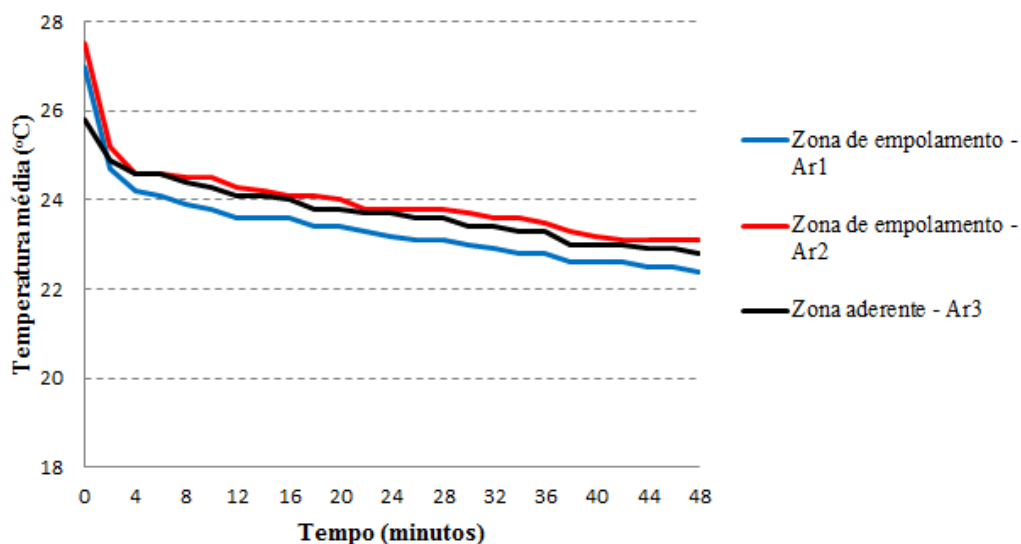


Fig. 6.34: Diferencial de temperaturas entre a zona aderente e a zona de empolamentos ao longo do tempo (aquecimento por radiação).

A sequência completa dos termogramas obtidos ao longo do ensaio consta no Anexo B.4.1.

Face ao exposto, nos restantes ensaios termográficos em laboratório apenas se realizou aquecimento dos provetes com a placa quente por condução.

Detecção de água

Após a injeção de água entre a membrana de impermeabilização e o suporte, e tal como no ensaio anterior, o provete com anomalias foi aquecido previamente, com uma placa quente, durante um período de 30 minutos. Desta forma, criou-se um fluxo térmico no provete em estudo e foi possível a identificação das anomalias.

Como se verificou que o aquecimento por radiação não originava grandes diferenciais de temperatura para uma correcta análise das anomalias, optou-se apenas por realizar aquecimento por condução.

Depois de se retirar a placa de aquecimento, verifica-se na figura 6.35 que a zona de empolamento Ar2 continua a apresentar temperaturas superficiais maiores que as zonas circundantes. No entanto, a zona onde se injectou a água, Ar1, apresenta agora temperaturas superficiais mais baixas do que a zona aderente, ao contrário do comportamento obtido nessa zona quando só existia espaço de ar entre a impermeabilização e o suporte.

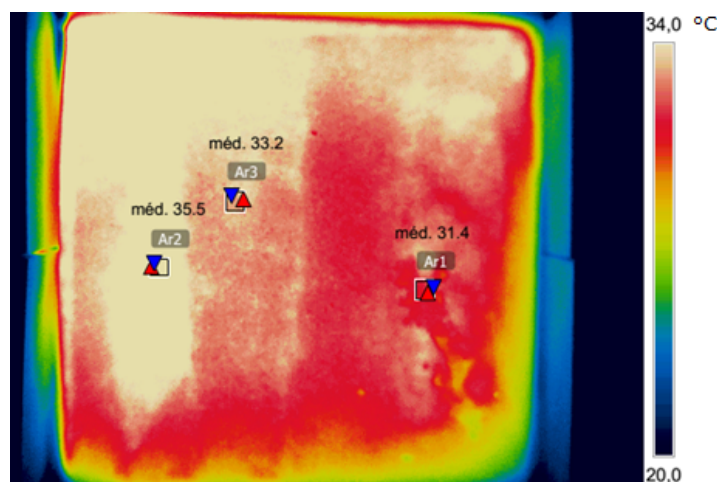


Fig. 6.35: Termograma obtido logo após a retirada da placa de aquecimento (0 minutos), detecção de água.

Confirma-se assim, ao analisar o gráfico da figura 6.36, que a zona de empolamento continua a apresentar o mesmo comportamento obtido durante o ensaio anterior, pois atinge temperaturas mais elevadas nos instantes iniciais e arrefece mais rapidamente ao longo do tempo do que a zona aderente.

O comportamento da zona com água, no entanto, é exactamente o oposto. Na zona onde a água foi injectada verifica-se que as temperaturas superficiais são mais baixas do que as das restantes zonas, logo após a retirada da placa de aquecimento. Esse comportamento explica-se pela elevada inércia térmica da água. O suporte, ao ficar húmido, consegue absorver e armazenar maiores quantidades de energia térmica sem que a alteração do seu estado termodinâmico seja significativa. Ou seja, nos locais onde o suporte fica molhado a inércia térmica é mais elevada do que nas zonas secas circundantes e, assim, como demora mais tempo a aquecer, origina temperaturas superficiais mais baixas ao longo do tempo do que as restantes zonas.

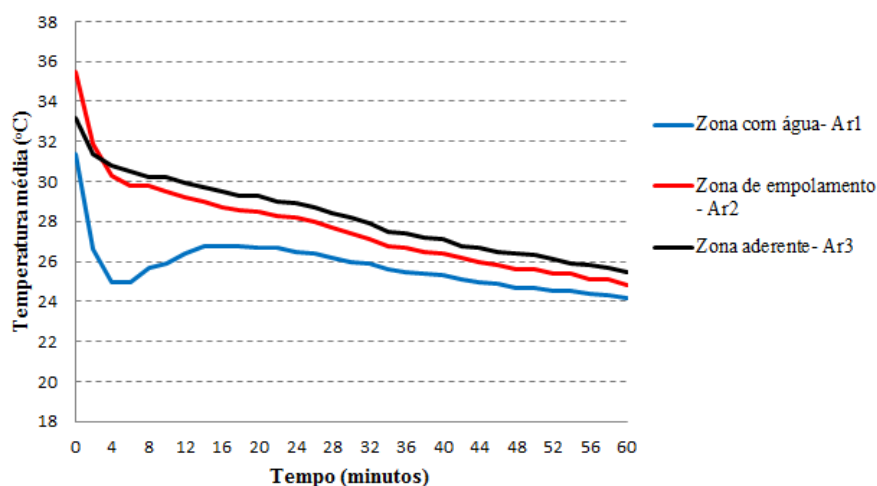


Fig. 6.36: Avaliação do comportamento da zona aderente, zona com empolamento e zona com água.

Na figura 6.36 verifica-se também que o diferencial de temperatura entre a zona onde se injectou a água e a zona aderente é mais acentuado nos minutos iniciais. Esse arrefecimento inicial deve-se à evaporação da água que se encontrava à superfície do provete. Quando se recorreu à injeção através de uma seringa foi derramada alguma água sobre essa zona, como se pode ver na figura 6.37, gerando-se um ligeiro humedecimento à superfície. O fenómeno que ocorre nesses minutos iniciais explica-se pelo facto do fenómeno físico de evaporação ser endotérmico, ou seja, é necessário fornecer-lhe energia para que ela ocorra. Assim, como ocorre uma absorção de energia térmica durante o processo, a temperatura superficial desses locais sofre um abaixamento significativo.



Fig. 6.37: Provete com zona de humedecimento visível à superfície após a injeção de água nessa zona.

Após 6 minutos do final do aquecimento com a placa quente, a zona onde ocorreu o arrefecimento acentuado começa a aumentar a sua temperatura até estabilizar aos 14 minutos, momento a partir do qual começa a arrefecer (figura 6.36). Este aumento de temperatura entre os 6 e os 14 minutos é explicado pelo humedecimento à superfície ter ocorrido apenas numa pequena zona. A área circundante, como manteve a temperatura mais elevada por não existir evaporação à superfície, começa a influenciar a zona onde essa evaporação ocorreu por condução, originando a subida da temperatura da área mais fria até se obter o equilíbrio térmico entre as duas zonas. Esse equilíbrio é então atingido ao fim de 14 minutos,

aproximadamente, correspondendo ao momento em que a temperatura começa a descer, como seria esperado durante um período de arrefecimento.

O diferencial de temperaturas obtido durante o período de arrefecimento é sempre maior entre a zona molhada e a zona totalmente aderente, do que entre a zona de empolamento e a zona aderente, como se pode observar no gráfico da figura 6.38.

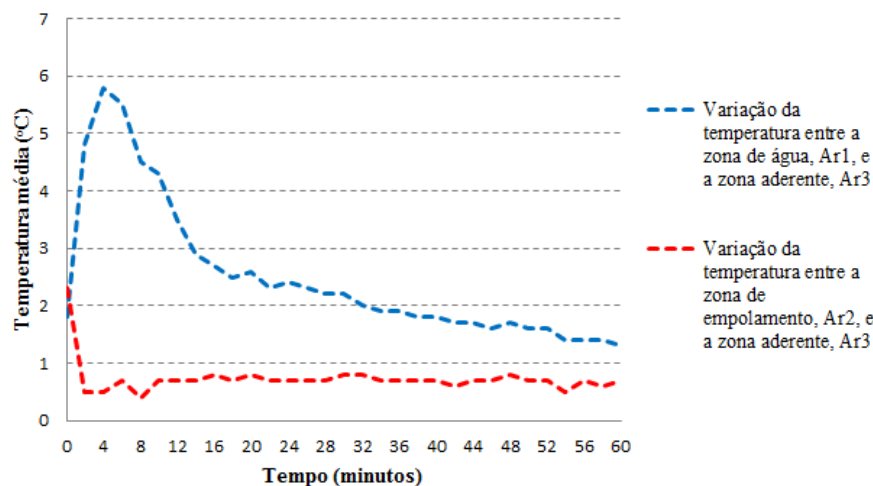


Fig. 6.38: Variação da temperatura entre as zonas com anomalias (água ou empolamento) e a zona aderente.

No caso da zona molhada conseguem-se obter diferenças de temperatura que atingem cerca de 3°C , ao longo do período de arrefecimento. No entanto, na zona de empolamento esse diferencial é muito menor, cerca de 0.7°C , dificultando a diferenciação das várias zonas à medida que o período de arrefecimento vai decorrendo.

A sequência completa dos termogramas obtidos ao longo do ensaio consta no Anexo B.4.2.

Alteração do ângulo de observação

Para avaliar o erro associado ao adoptar um ângulo de observação de 60° entre a câmara termográfica e a normal à superfície do provete em análise, preservaram-se três pontos (Ar1, Ar2 e Ar3) entre o ensaio realizado na perpendicular ao provete, e o ensaio a 60° com a normal (figuras 6.39 e 6.40).

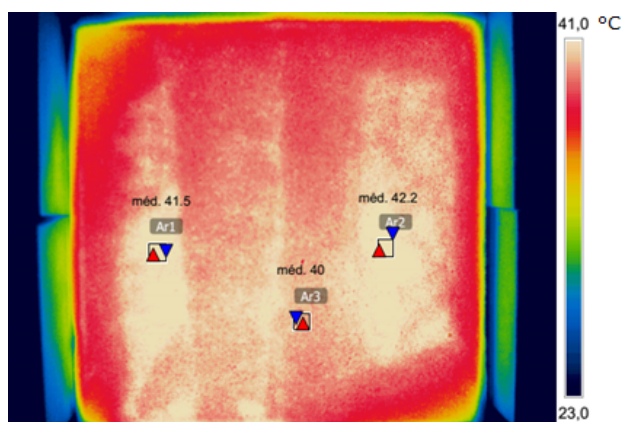


Fig. 6.39: Termografia obtida com a câmara perpendicular ao provete logo após ter sido retirada a placa de aquecimento (0 minutos).

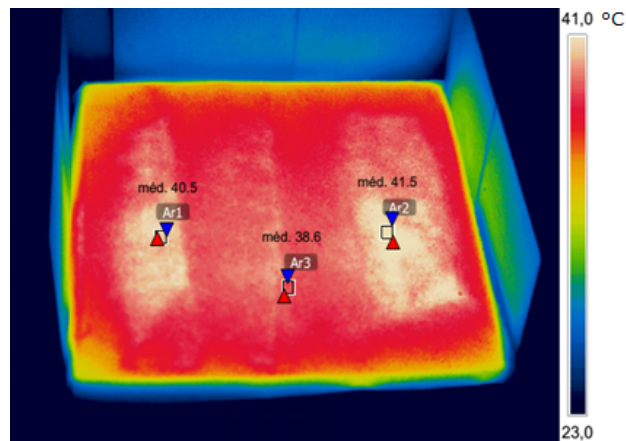


Fig. 6.40: Termografia obtida com a câmara a 60° com a normal à superfície do provete logo após ter sido retirada a placa de aquecimento (0 minutos).

Após se terem obtido os termogramas das duas medições, ao longo de um período de 60 minutos, foi possível representar a variação da temperatura superficial, tanto na zona Ar1 como na zona Ar2 (figura 6.41).

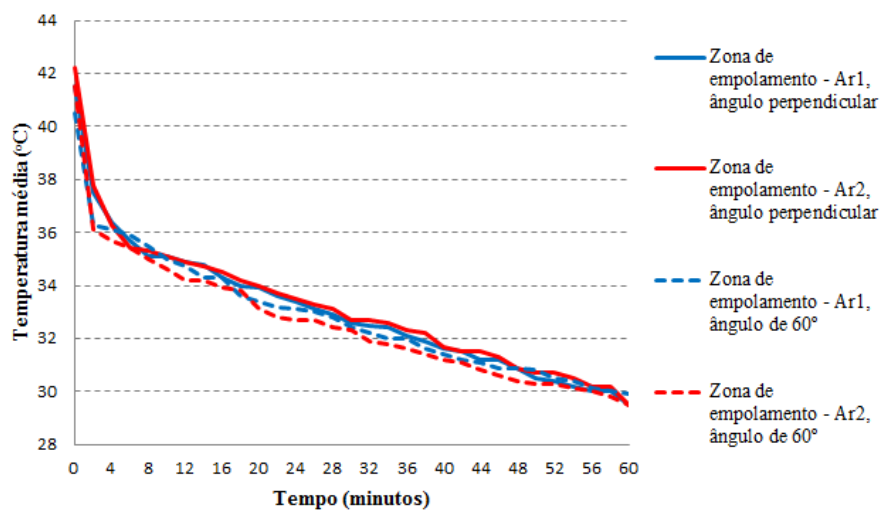


Fig. 6.41: Efeito da alteração do ângulo de observação na temperatura superficial do provete.

Na figura 6.41, é possível visualizar que a variação da temperatura entre as duas medições é muito semelhante, ao longo do tempo. O diferencial de temperatura observado entre os resultados obtidos com os dois ângulos de observação é muito reduzido, tanto para a zona Ar1 como a zona Ar2, o que permite concluir que o erro associado à adopção de um ângulo até 60° com a perpendicular é bastante reduzido. No entanto, verifica-se que com a câmara colocada na perpendicular do provete, as temperaturas das zonas de empolamentos são um pouco mais elevadas (figuras 6.39 e 6.40). Essa diferença resulta da radiação emitida pela superfície chegar em maior quantidade à câmara termográfica quando esta está na perpendicular do provete.

Apesar de existir um pequeno erro associado à alteração do ângulo de observação para os 60° com a normal, este não tem grande influência na análise qualitativa realizada nos provetes, pois a identificação

das anomalias continua a ser possível. Este facto, associado à grande vantagem de não ser necessária a utilização de um suporte para garantir a perpendicularidade entre a câmara e a superfície a inspeccionar, torna este método de inspecção o mais viável para aplicação em casos reais.

A sequência completa dos termogramas obtidos ao longo do ensaio consta no Anexo B.4.3.

Provete sem anomalias

O principal objectivo da análise termográfica no provete sem anomalias era verificar que, após o aquecimento com a placa quente, se obteria uma imagem termográfica com distribuição de temperaturas homogéneas. Tal como na detecção de água nos provetes, o aquecimento do provete no ensaio foi realizado por condução.

As figuras 6.42 e 6.43 representam a distribuição de temperaturas no provete sem anomalias imediatamente após o aquecimento, e cerca de 2 minutos após, respectivamente. Da observação das figuras referidas, verifica-se que, apesar da maior parte da impermeabilização se encontrar aderente ao suporte, existem três zonas onde é possível detectar empolamentos da membrana.

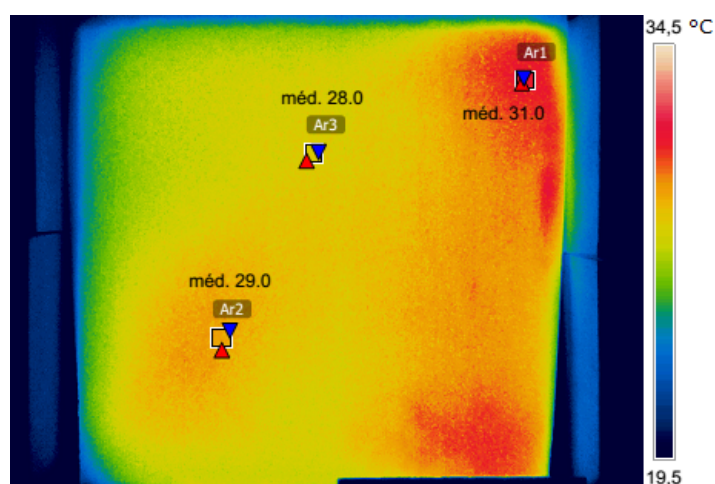


Fig. 6.42: Termograma obtido logo após a retirada da placa de aquecimento (0 minutos), análise do provete sem anomalias.

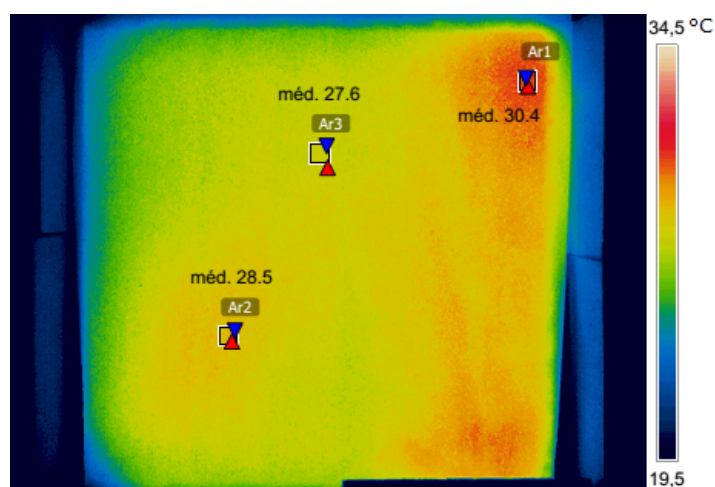


Fig. 6.43: Termograma obtido após um período de arrefecimento de 2 minutos, análise do provete sem anomalias.

Neste caso específico, ao contrário do provete onde foram simulados empolamentos, as anomalias existentes não foram efectuadas propositadamente. Estas anomalias resultam, essencialmente, da dificuldade em executar os remates da impermeabilização nas zonas laterais através da soldadura por chama (figura 6.44). Como os remates não ficaram bem executados nas zonas laterais, observa-se que é junto aos cantos que as zonas de empolamentos mais se destacam, como seria de esperar (figura 6.42.)



Fig. 6.44: Descolamento da membrana de impermeabilização junto ao canto superior direito do provete ensaiado.

Apesar do objectivo inicial não ter sido totalmente conseguido, ou seja, obter uma distribuição de temperaturas homogénea em todo o provete após o aquecimento, consegue-se perceber ainda assim, por observação das figuras 6.42 e 6.43, que quando a superfície da membrana se encontra aderente ao suporte as temperaturas superficiais nessa zona são muito semelhantes.

O facto de se ter confirmado que, realmente, a membrana não estava perfeitamente aderente nas zonas laterais (figura 6.44), veio comprovar o potencial da termografia de infravermelhos para a detecção de empolamentos.

Verificou-se também, durante os ensaios em laboratório, que é possível detectar a existência de água entre a membrana de impermeabilização e o suporte, através deste método. Assim, como se conseguiu a distinção entre zonas aderentes e zonas com anomalias, conclui-se que o método não destrutivo de termografia de infravermelhos é viável para a detecção de anomalias em impermeabilizações.

6.2.2 Ensaios *in situ* com anomalias controladas

Mapeamento das anomalias

Antes de se iniciarem os ensaios no exterior, foram realizados mapeamentos das anomalias nos dois provetes, a) e b), que tinham sido previamente sujeitos a ensaios de resistência à sucção do vento, como se referiu no ponto 5.3.3. O mapeamento dos vários tipos de empolamentos, e de outras anomalias existentes, é bastante importante para perceber o potencial da técnica e para realizar interpretações adequadas das análises termográficas. Assim, durante a realização dos termogramas, é possível identificar se as áreas detectadas previamente são, ou não, visíveis através das distribuições de temperaturas obtidas.

No entanto, apesar de ter sido realizado um mapeamento para cada tipo de provete estudado, provete a) e provete b), apenas se apresentará como exemplo o mapeamento efectuado sobre o provete b). Toda a informação relativa ao provete a) é apresentada no Anexo B.5.1.

A representação das várias zonas de anomalias no provete b) seco, ilustra-se na figura 6.45.

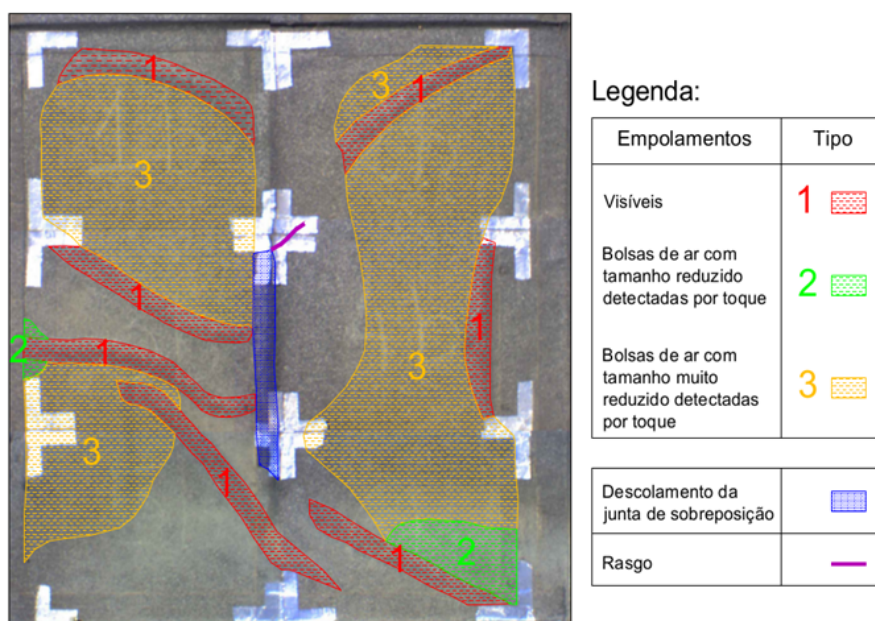


Fig. 6.45: Mapeamento das anomalias existentes no provete *b*).

Para a análise do provete *b*), após ter sido sujeito a molhagem (chuva), e de modo a avaliar o potencial da termografia para a detecção da presença de água, o estudo prévio também deve ser realizado, como se pode observar na figura 6.46.

Antes de se efectuar a campanha experimental para a detecção de água sob o revestimento de impermeabilização, observaram-se, durante o mapeamento, zonas onde existia acumulação de água, local onde a água vai ficar estagnada durante mais tempo e onde há uma maior possibilidade de infiltração, e zonas de rasgo e descolamento da junta de sobreposição, locais onde irá existir uma maior infiltração de água.

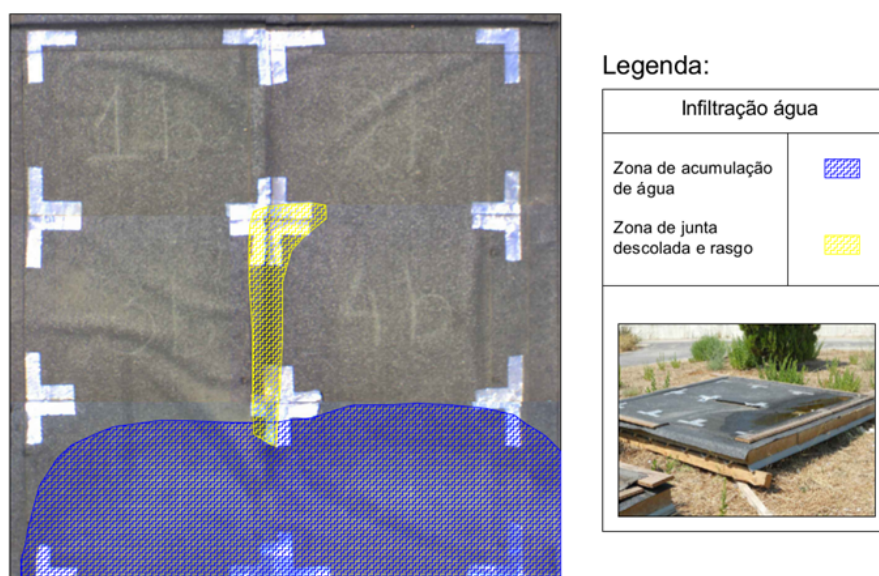


Fig. 6.46: Locais com maior probabilidade de ocorrência de infiltração de água no provete *b*).

Detecção de empolamentos

Tal como aconteceu nos ensaios em laboratório, foi necessário criar um fluxo térmico no provete, de forma a detectar as anomalias através da termografia de infravermelhos. Todavia, o fluxo térmico necessário à detecção de anomalias no exterior é imposto pelo sol, como se mencionou no ponto 5.3.1. Assim, os provetes estiveram expostos à radiação solar durante o período da manhã, até à realização dos ensaios por volta das 14 horas.

Durante o período de aquecimento, início da tarde, obtiveram-se termogramas em todos os rectângulos da grelha traçada para cada um dos provetes. As condições exteriores na altura do ensaio são apresentadas no quadro 6.2.

Quadro 6.2: Condições exteriores medidas no início do ensaio (14 horas).

Humidade relativa - Hr [%]	Temperatura exterior - T [°C]
48.9	27.9

De forma a não repetir a informação relativa ao comportamento dos dois provetes ensaiados, apenas serão apresentados os resultados relativos ao provete *b*). Os resultados obtidos para o provete *a*) são apresentados no Anexo B.5.2.

As anomalias detectadas são apresentadas numa imagem termográfica total (figura 6.47) e de forma mais pormenorizada em cada um dos rectângulos da grelha traçada (figuras 6.48, 6.49, 6.50, 6.51, 6.52 e 6.53).

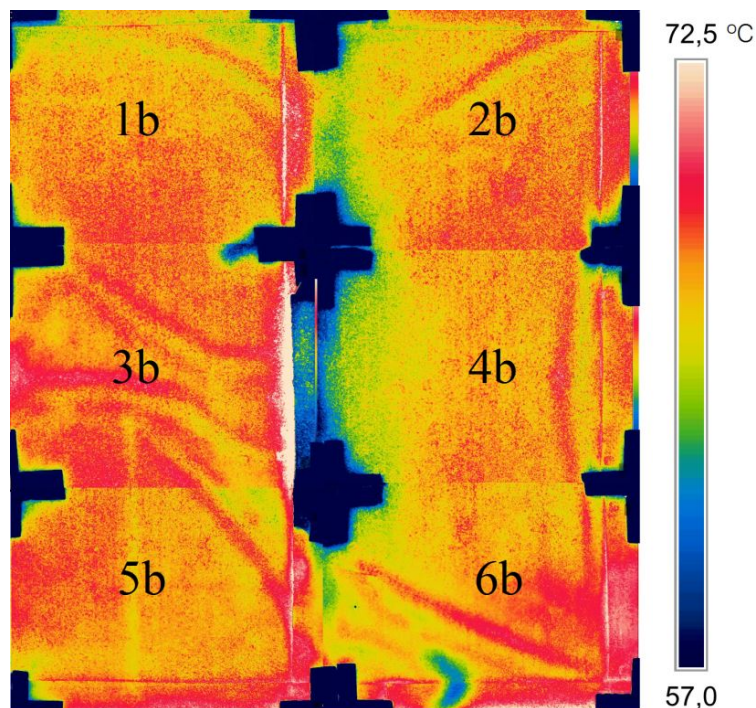


Fig. 6.47: Imagem termográfica total do provete *b*) correspondente à detecção de empolamentos.

1b	2b
3b	4b
5b	6b

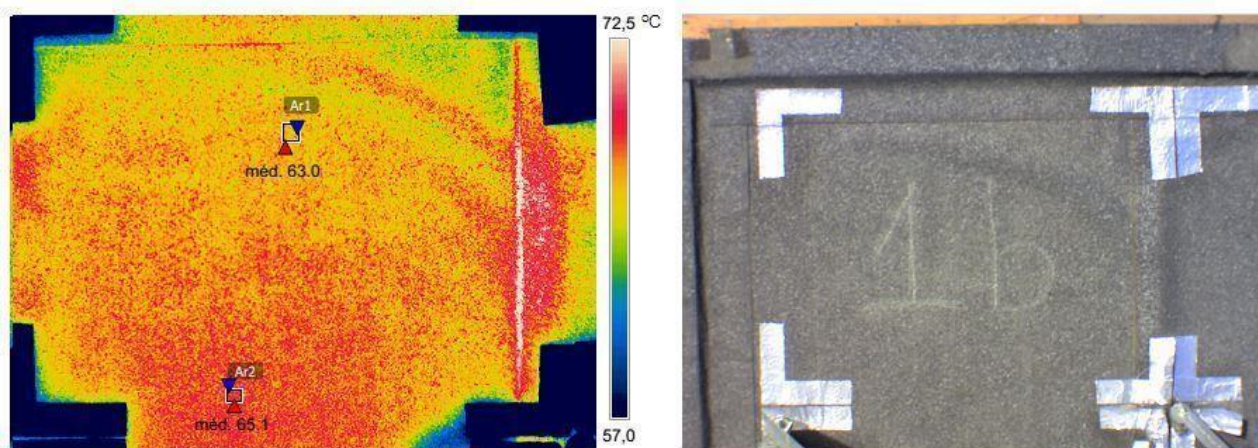


Fig. 6.48: Termograma (esq.) e imagem real (dir.) do rectângulo 1b.

1b	2b
3b	4b
5b	6b

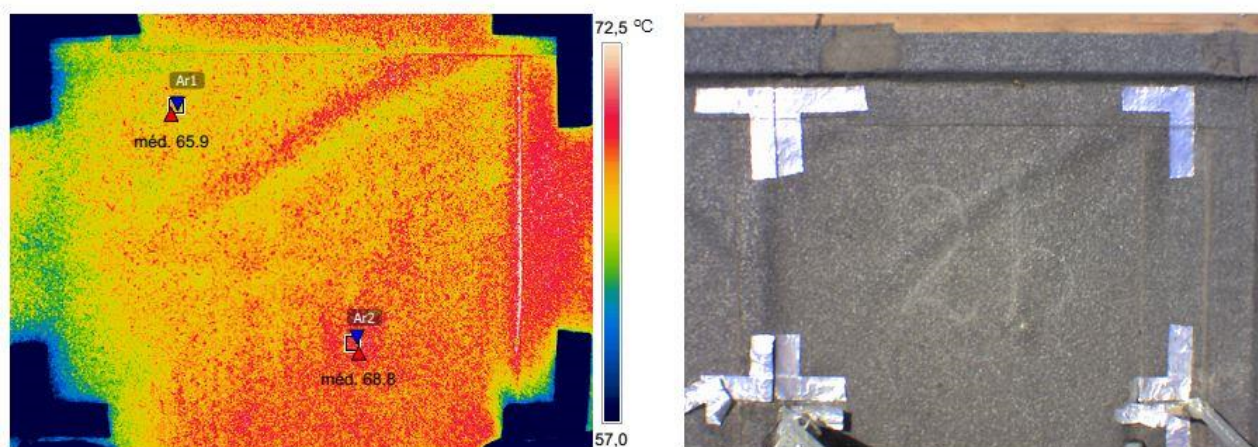


Fig. 6.49: Termograma (esq.) e imagem real (dir.) do rectângulo 2b.

1b	2b
3b	4b
5b	6b

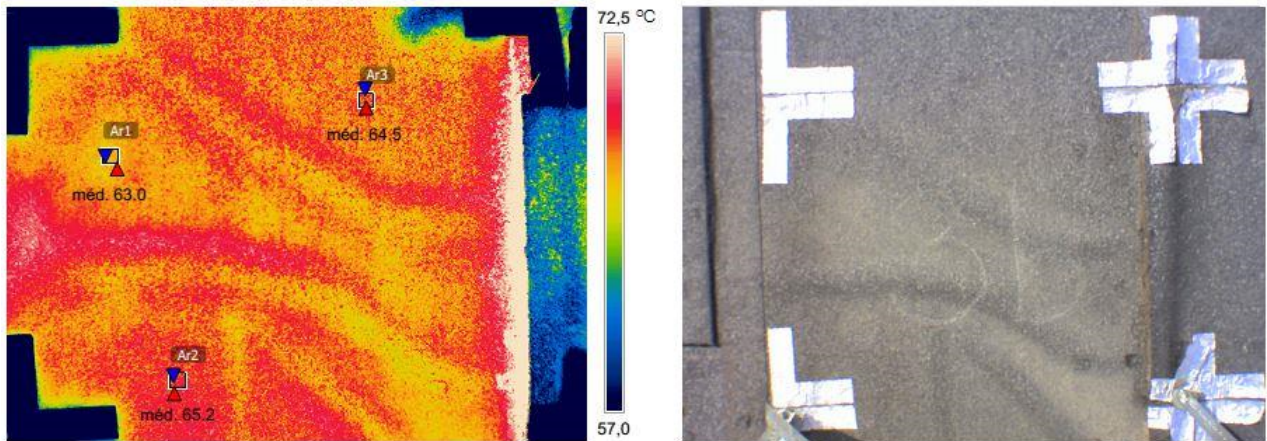


Fig. 6.50: Termograma (esq.) e imagem real (dir.) do rectângulo 3b.

1b	2b
3b	4b
5b	6b

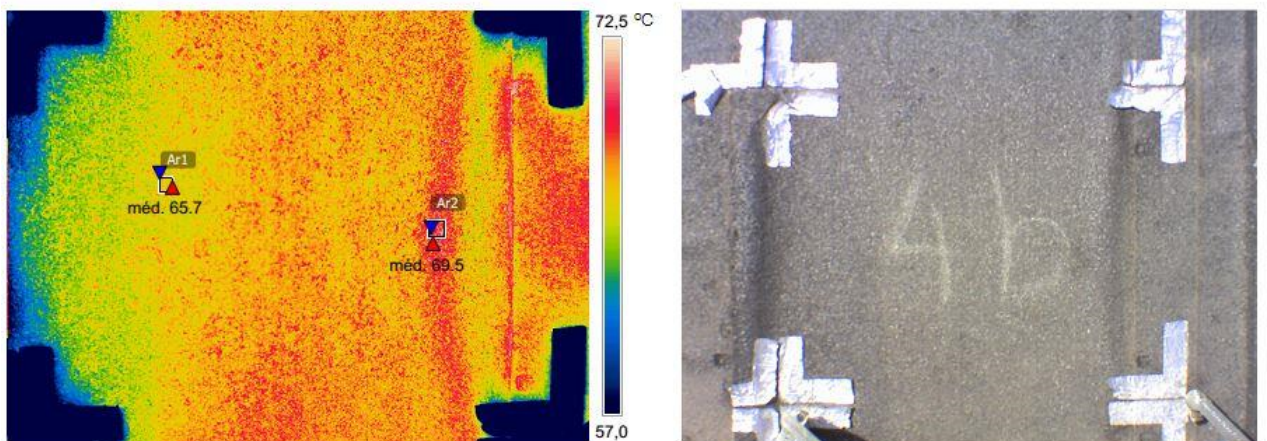


Fig. 6.51: Termograma (esq.) e imagem real (dir.) do rectângulo 4b.

1b	2b
3b	4b
5b	6b

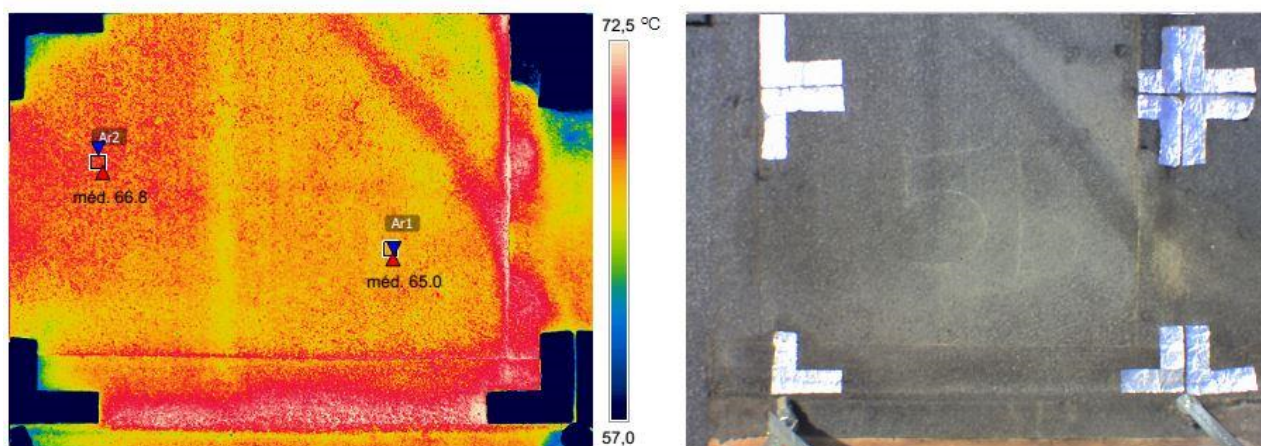


Fig. 6.52: Termograma (esq.) e imagem real (dir.) do rectângulo 5b.

1b	2b
3b	4b
5b	6b

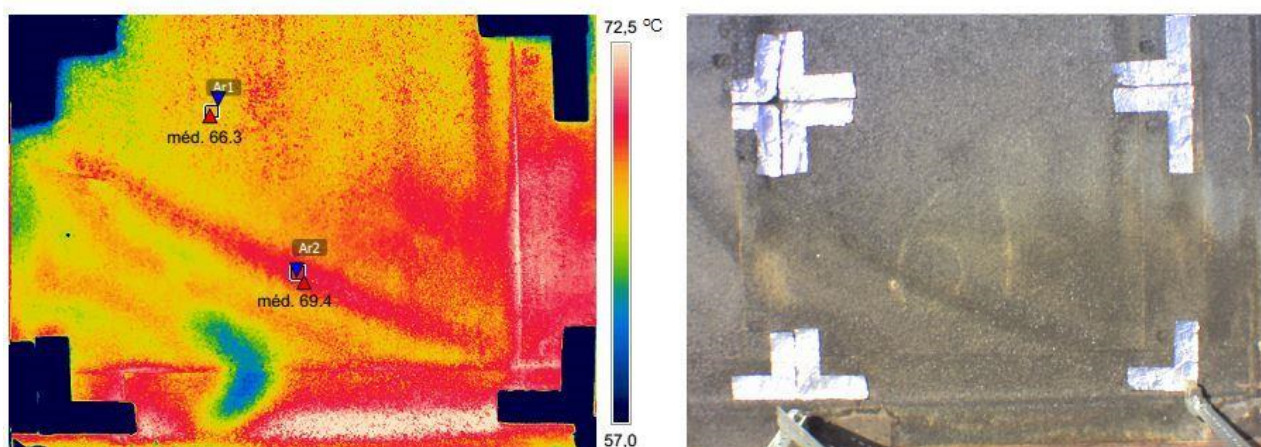


Fig. 6.53: Termograma (esq.) e imagem real (dir.) do rectângulo 6b.

Ao analisar cada um dos rectângulos da grelha verifica-se que as zonas com temperatura superficial mais alta, observadas por termografia de infravermelhos, correspondem à localização dos empolamentos detectados previamente. Este comportamento já era esperado depois da análise realizada em laboratório, onde se explicou o fenómeno de forma mais pormenorizada (ponto 6.2.1).

Para além da campanha realizada no período de aquecimento, por volta das 14 horas, foi também realizada uma campanha experimental durante o período de arrefecimento, pelas 20 horas do mesmo dia. No entanto, não foi possível tirar conclusões significativas desse ensaio. Como os provetes estão sujeitos a condições de ventilação diferentes das de uma cobertura normal, qualquer alteração das condições climáticas faz com que exista um abaixamento significativo das temperaturas superficiais. A inércia térmica dos provetes também é muito inferior à de uma cobertura normal, o que leva a um arrefecimento mais rápido. Assim, como não existiam diferenciais de temperatura consideráveis entre a temperatura superficial e a temperatura ambiente, não foi possível detectar empolamentos nos provetes.

Detecção de água

Após um período de precipitação longo, cerca de uma semana, foram realizados novos ensaios nos provetes. Esta campanha teve como objectivo a detecção de água sob o revestimento de impermeabilização.

A análise foi efectuada no dia seguinte ao período de chuva e durante o período de aquecimento, por volta das 14 horas e 30 minutos. As condições ambiente exteriores medidas no início do ensaio são apresentadas no quadro 6.3.

Quadro 6.3: Condições exteriores medidas no início do ensaio (14 horas e 30 minutos).

Humidade relativa - Hr [%]	Temperatura exterior - T [°C]
66.3	24.0

Tanto o provete *a*) como o provete *b*) estiveram expostos à energia solar antes do ensaio ser realizado. Desta forma, garantiu-se que as superfícies estavam totalmente secas e que os materiais tinham aquecido o suficiente para existir diferenciais de temperatura.

Os dados apresentados de seguida dizem respeito apenas ao provete *b*). Todos os resultados correspondentes ao provete *a*) são apresentados no Anexo B.5.3. A detecção de água no provete *b*) através do método não destrutivo de termografia de infravermelhos encontra-se ilustrada na figura 6.54.

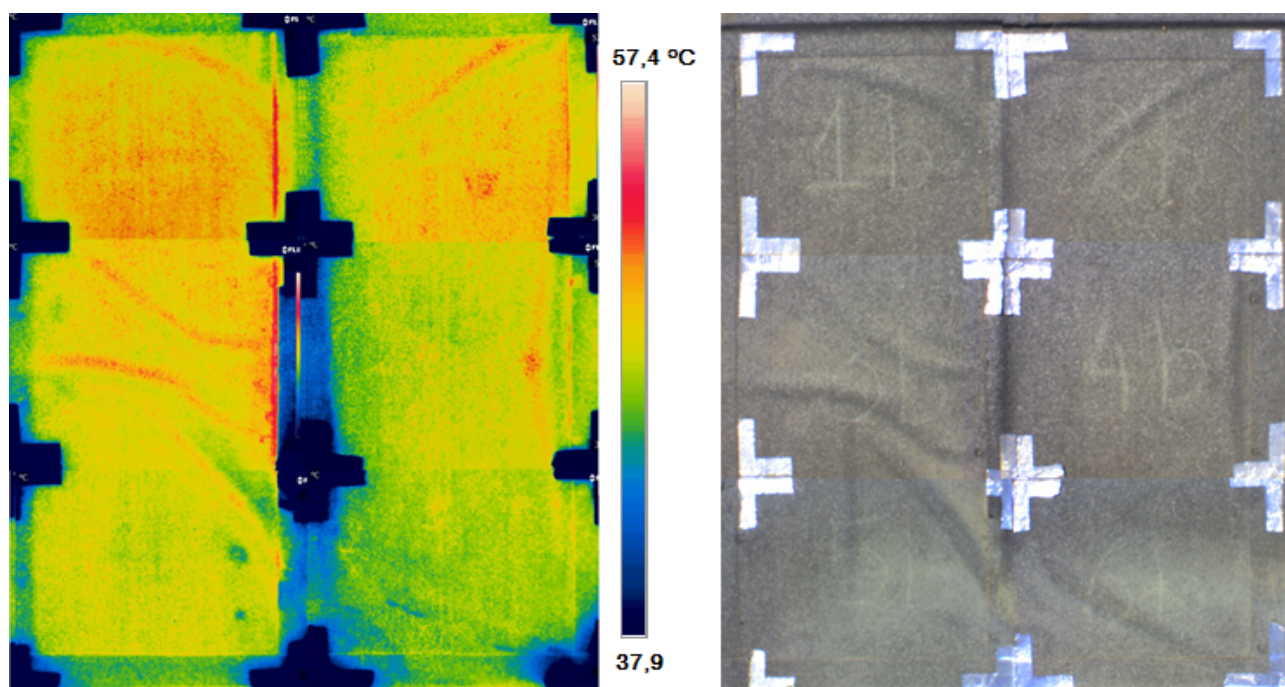


Fig. 6.54: Imagem termográfica total do provete b) correspondente à detecção de água sob o revestimento de impermeabilização - período aquecimento - (esq.) e imagem real (dir.).

Os locais onde se observam temperaturas superficiais mais baixas correspondem, de um modo geral, às zonas onde ocorreu acumulação de água e outras anomalias, como rasgos e descolamento da junta de sobreposição (figura 6.54).

Nas zonas onde se acumulou água sobre a membrana e onde existiu infiltração, o humedecimento do suporte fez com que a inércia térmica nessas zonas aumentasse e, dessa forma, como demoram mais tempo a aquecer que os restantes materiais, obtêm-se temperaturas superficiais mais baixas. A análise dos termogramas permite identificar esses locais; no entanto, as manchas não são delimitadas com grande exactidão. O único local onde se podem tirar conclusões, com maior certeza, é na zona de descolamento e rasgo da membrana de impermeabilização. Nessa área, verificam-se temperaturas superficiais muito mais baixas, o que indicia a existência de maiores quantidades de água. Como nessa zona o contacto com o ar é maior, as condições de evaporação também são facilitadas relativamente às restantes zonas e, por esse motivo, são detectadas temperaturas superficiais mais baixas.

Um dia após a ocorrência de precipitação foi realizada uma nova campanha experimental nos provetes. No entanto, com o intuito de avaliar o comportamento da água durante o período de arrefecimento, realizou-se apenas a campanha experimental próximo do horário nocturno, por volta das 19 horas. A humidade relativa e a temperatura do ambiente exterior, medidas no início do ensaio, são apresentadas no quadro 6.4.

Quadro 6.4: Condições exteriores medidas no início do ensaio (19 horas).

Humidade relativa - Hr [%]	Temperatura exterior - T [°C]
65.1	22.9

Os resultados obtidos nessa campanha são apresentados na figura 6.55.

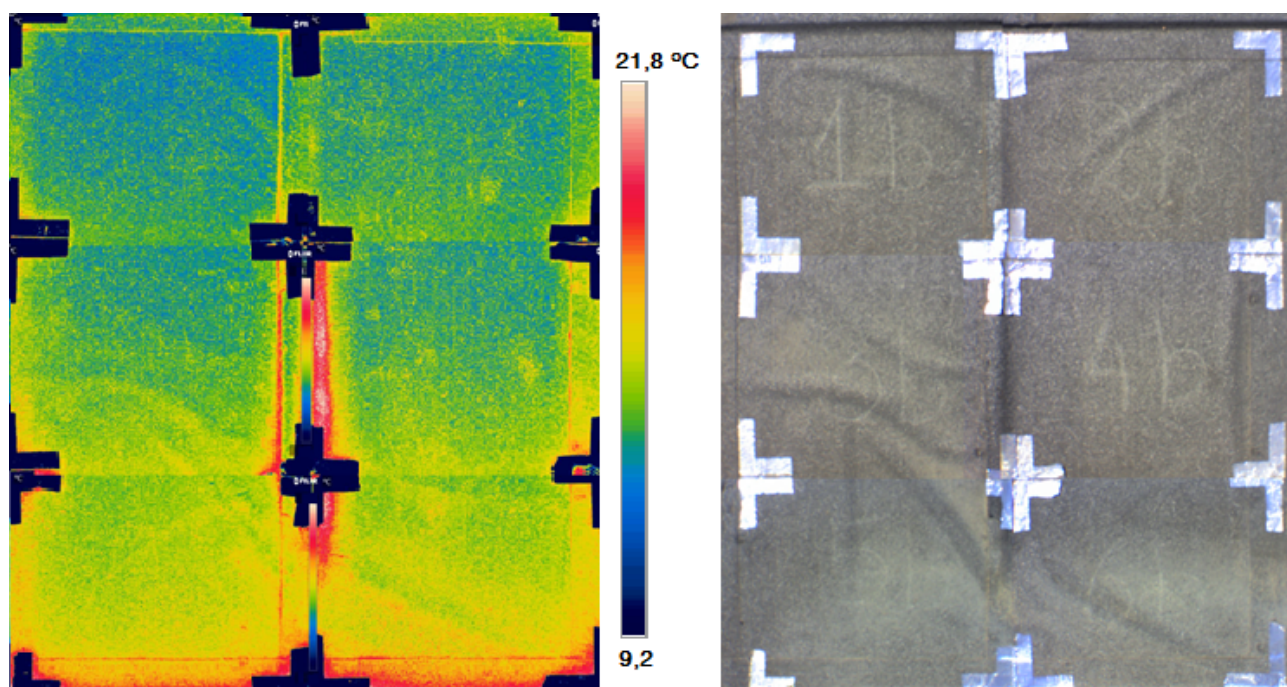


Fig. 6.55: Imagem termográfica total do provete *b*) correspondente à detecção de água sob o revestimento de impermeabilização - período arrefecimento - (esq.) e imagem real (dir.).

Durante o período de arrefecimento as temperaturas superficiais mais altas coincidiram com as zonas de presença de água sob o revestimento de impermeabilização. A explicação é semelhante à que foi dada para o período de aquecimento. Na região onde o suporte se encontra humedecido, resultante da infiltração da água da chuva, é absorvida e armazenada uma grande quantidade de energia ao longo do dia. Como o ensaio foi realizado ao pôr-do-sol, ou seja, quando já não era fornecida energia térmica ao provete, os materiais constituintes começaram a libertar calor. Como as zonas molhadas acumularam mais calor ao longo do dia, arrefecem mais lentamente que as áreas que se encontravam secas. Por esse motivo, se justifica que as zonas mais quentes correspondem a zonas de suporte molhado, nesta fase do dia.

Neste período de observação, visualiza-se com facilidade as zonas mais ou menos molhadas, principalmente a área correspondente ao descolamento e ao rasgo da membrana. Nessa região a quantidade de água é muito maior do que nas restantes, pois mostra temperaturas superficiais muito mais elevadas (figura 6.55).

Alteração do ângulo de observação

Após se ter realizado a campanha experimental no período de arrefecimento, efectuaram-se novos ensaios nos provetes, mas desta vez sem a utilização do suporte metálico. Para a realização destes ensaios adoptou-se um ângulo de observação de aproximadamente 60° com a vertical, à semelhança do ensaio realizado em laboratório, de acordo com esquema da figura 6.56.

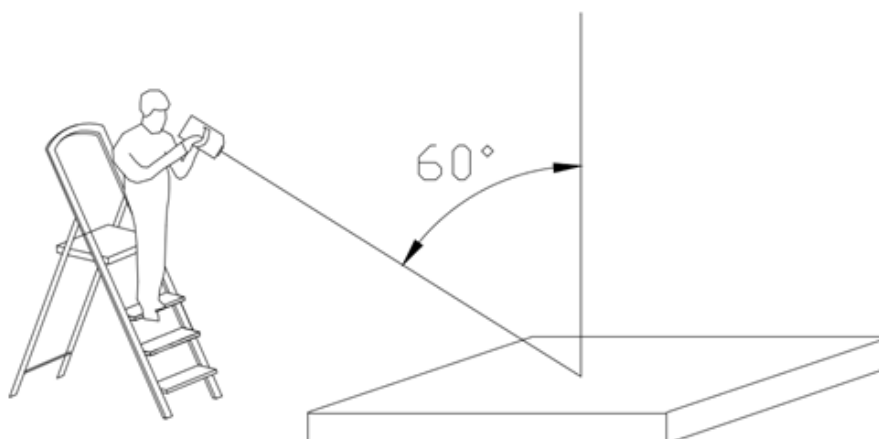


Fig. 6.56: Esquema adoptado no exterior para a verificação do erro associado à variação do ângulo de observação.

Os resultados obtidos para a variação do ângulo de observação para 60° são apresentados na figura 6.57.

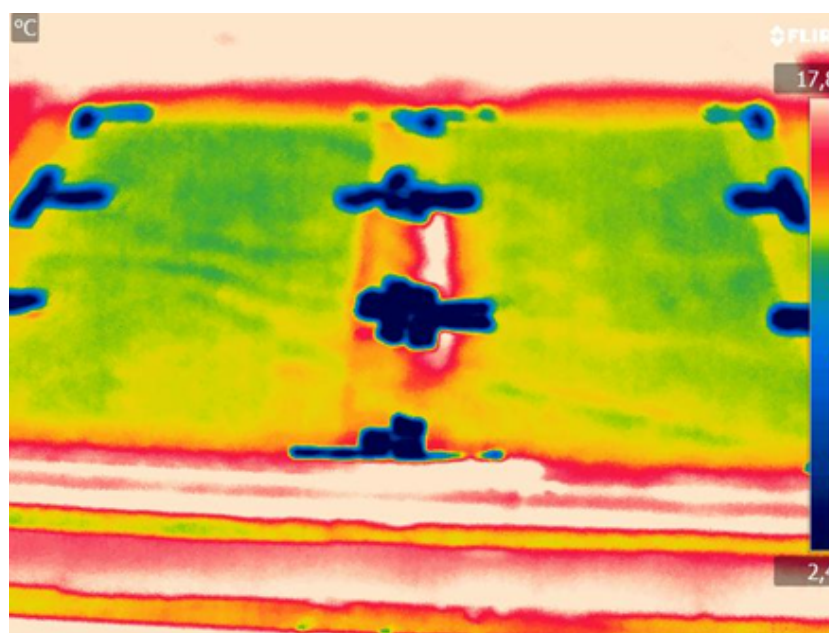


Fig. 6.57: Termograma do provete *b*) obtido com um ângulo de observação de 60° com a normal à superfície do provete - período arrefecimento.

Após a análise dos termogramas correspondentes, a antes e depois da alteração do ângulo de observação, figuras 6.55 e 6.57, respectivamente, conclui-se que o erro associado é muito reduzido, como já tinha sido comprovado nos ensaios realizados em laboratório. Apesar de existirem pequenas variações nas temperaturas superficiais, entre as termografias realizadas antes e após a alteração do ângulo, continua a ser possível detectar a água sob o revestimento de impermeabilização, assim como as zonas com maior ou menor quantidade de água. Por esse motivo, este tipo de inspeção é a mais adequada para aplicação em casos reais, pois para além de permitir a detecção de anomalias inequivocamente, não necessita da utilização do suporte metálico que, devido às suas dimensões excessivas provocaria problemas logísticos associados ao transporte. A adopção de um ângulo não perpendicular ao provete, neste caso de 60° com

a sua normal, tem também como vantagem a avaliação do provete no seu todo, pois o ângulo de visão é maior.

6.2.3 Avaliação de coberturas *in situ* em condições reais

Célula experimental C5

Como já se referiu anteriormente procedeu-se à inspecção de coberturas *in situ* para validação do estudo efectuado em laboratório. As imagens termográficas totais da cobertura da célula C5, durante o período de aquecimento e arrefecimento, são apresentadas nas figuras 6.58 e 6.62, respectivamente.

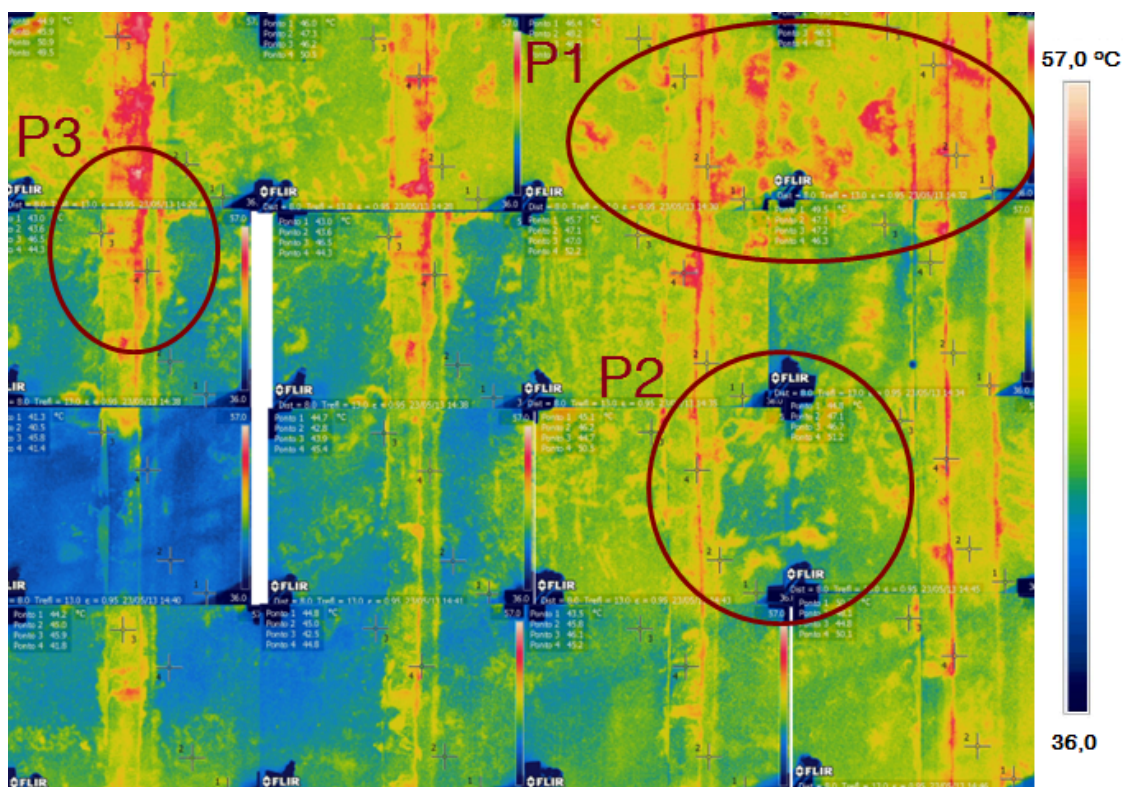


Fig. 6.58: Imagem termográfica total da cobertura C5 obtida na campanha do início da tarde - período de aquecimento.

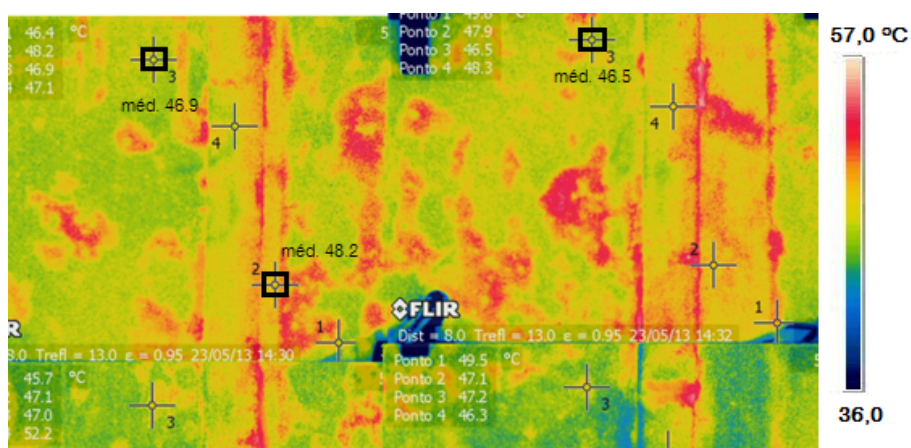


Fig. 6.59: Pormenor 1 com a representação dos empolamentos - período de aquecimento.

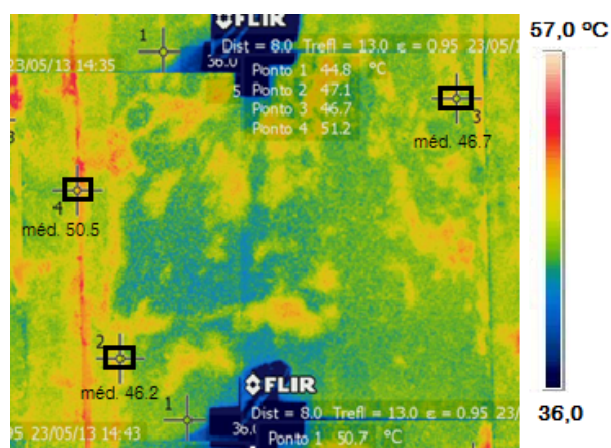


Fig. 6.60: Pormenor 2 com a representação dos empolamentos - período de aquecimento.

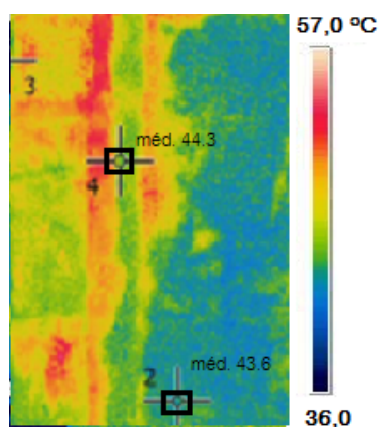


Fig. 6.61: Pormenor 3 com a representação dos empolamentos - período de aquecimento.

Para que se possa entender, de forma mais pormenorizada, a distribuição de temperaturas nas zonas de maior importância, apresentam-se nas figuras 6.59, 6.60 e 6.61 os pormenores indicados na imagem termográfica anterior (figura 6.58).

As condições ambiente exteriores medidas no início da inspecção (14 horas e 30 minutos) são apresentadas no quadro 6.5.

Quadro 6.5: Condições exteriores medidas no início da inspecção - célula experimental C5 (período de aquecimento).

Humidade relativa - Hr [%]	Temperatura exterior - T [°C]
52.9	23.5

Durante o período de aquecimento é possível concluir, observando a imagem termográfica total da cobertura C5 (figura 6.58) e os pormenores correspondentes (figuras 6.59, 6.60 e 6.61), que as zonas de empolamento se encontram mais quentes, superficialmente, do que as zonas aderentes circundantes, comportamento esperado depois de todos os ensaios realizados anteriormente. A explicação deste fenómeno é idêntica à mencionada nos ensaios em laboratório para a detecção de empolamentos (ponto 6.2.1). Quando existem espaços de ar entre a membrana de impermeabilização e o suporte, comprovados através de toque, a inércia térmica dessas zonas é muito menor do que a das zonas aderentes, o que faz com que aqueçam rapidamente quando sujeitas a solicitações de energia térmica, neste caso a energia proveniente da radiação solar.

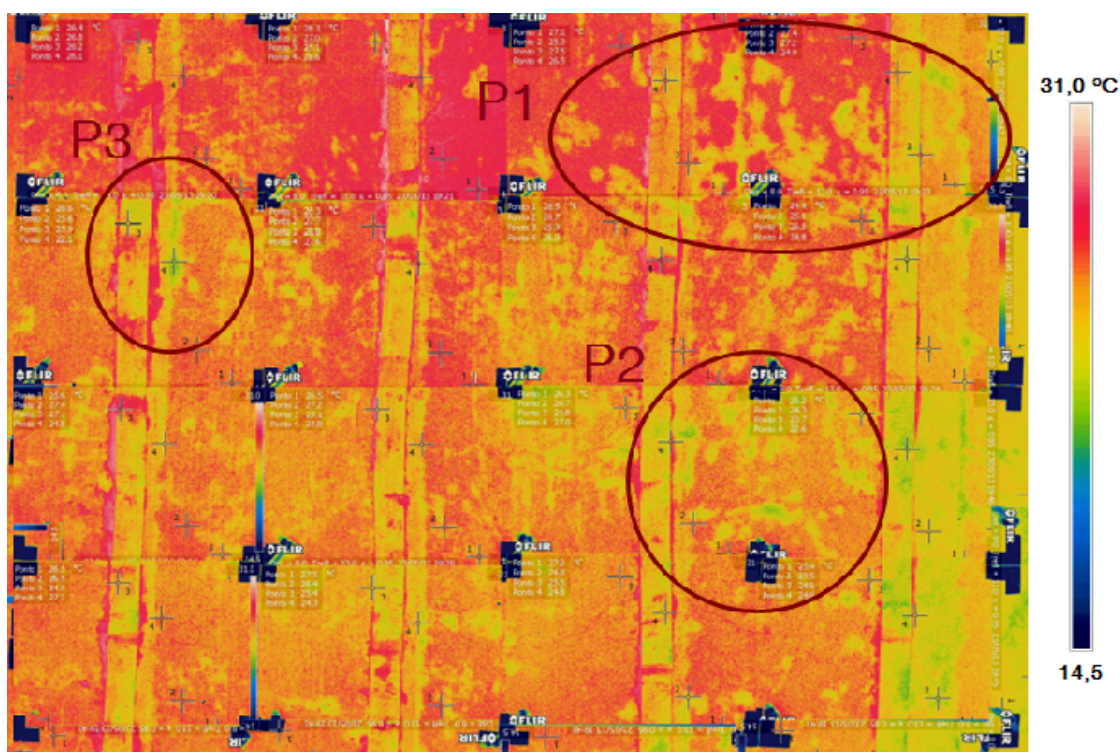


Fig. 6.62: Imagem termográfica total da cobertura C5 obtida na campanha do início da noite - período de arrefecimento.

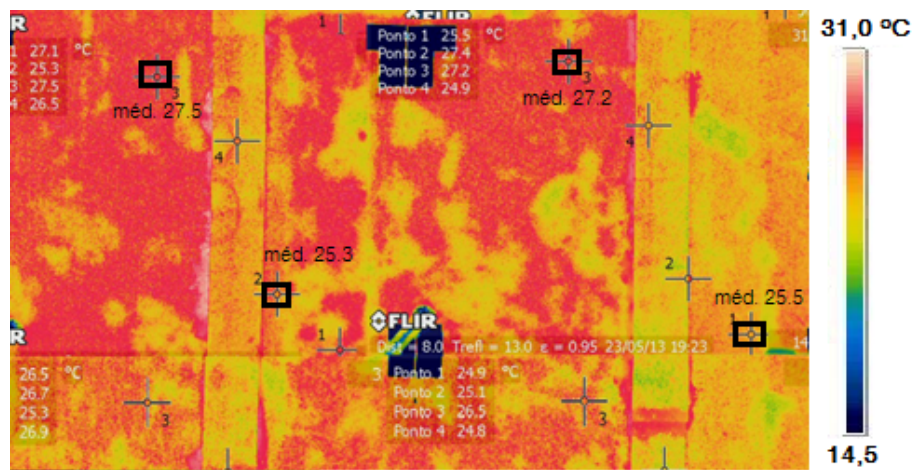


Fig. 6.63: Pormenor 1 com a representação dos empolamentos - período de arrefecimento.

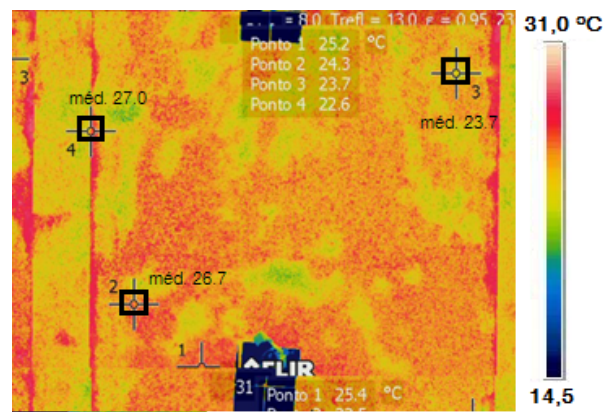


Fig. 6.64: Pormenor 2 com a representação dos empolamentos - período de arrefecimento.

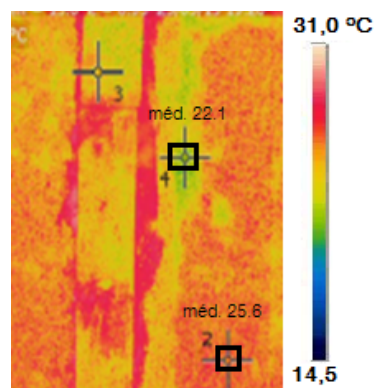


Fig. 6.65: Pormenor 3 com a representação dos empolamentos - período de arrefecimento.

As condições ambiente exteriores medidas durante o período de arrefecimento (19 horas e 30 minutos) são apresentadas no quadro 6.6.

Quadro 6.6: Condições exteriores medidas no início da inspecção - célula experimental C5 (período de arrefecimento).

Humidade relativa - Hr [%]	Temperatura exterior - T [°C]
56.7	20.4

Tal como seria de esperar, durante o período de arrefecimento o comportamento das zonas com empolamentos inverte-se, ou seja, as zonas de empolamentos apresentam neste período temperaturas superficiais mais frias, enquanto que as zonas aderentes se encontram mais quentes (figuras 6.62, 6.63, 6.64 e 6.65). Neste caso a explicação do fenómeno também já foi referida nos ensaios em laboratório (ponto 6.2.1). Como as zonas aderentes apresentam inércia térmica mais elevada, vão demorar mais tempo a libertar a energia que acumularam ao longo do dia, apresentando, por esse motivo, temperaturas superficiais mais elevadas.

Relativamente à detecção de água sob o revestimento de impermeabilização, pensou-se inicialmente que o método não tinha sido eficiente neste caso de estudo, pois não era visível nenhuma mancha delimitada com temperaturas superficiais mais baixas, no caso do período de aquecimento, nem com temperaturas superficiais mais altas, durante o período de arrefecimento. Este seria o comportamento expectável na detecção de água através da termografia face aos resultados obtidos (pontos 6.2.1 e 6.2.2). No entanto, mais tarde procedeu-se à substituição do revestimento de impermeabilização existente por um revestimento novo. Quando se removeu o revestimento de impermeabilização antigo analisado com a termografia, verificou-se que toda a superfície da cobertura da célula C5 se encontrava uniformemente molhada. Foi nessa altura que se percebeu que o método na realidade tinha sido eficaz, pois apenas não se tinham detectado manchas bem delimitadas porque a água se encontrava espalhada sobre toda a superfície da cobertura, não possibilitando diferenciação.

Edifício de habitação plurifamiliar

Na inspecção realizada a um edifício de habitação plurifamiliar também foi possível chegar aos mesmos resultados dos ensaios realizados em laboratório e no exterior.

As condições ambiente exteriores medidas no início da inspecção (13 horas) são apresentadas no quadro 6.7.

Quadro 6.7: Condições exteriores medidas no início da inspecção - edifício de habitação plurifamiliar (período de aquecimento)

Humidade relativa - Hr [%]	Temperatura exterior - T [°C]
44.3	17.7

Em algumas partes da cobertura em terraço eram bem visíveis as zonas de empolamentos, identificando-se estes locais por apresentarem temperaturas superficiais mais elevadas do que as zonas em seu redor (figuras 6.66 e 6.67). Para que não existissem dúvidas sobre a correcta identificação dos empolamentos procedeu-se também à identificação por percussão, ou seja, se essa zona emitisse som cavo concluía-se que o diagnóstico estava correcto.

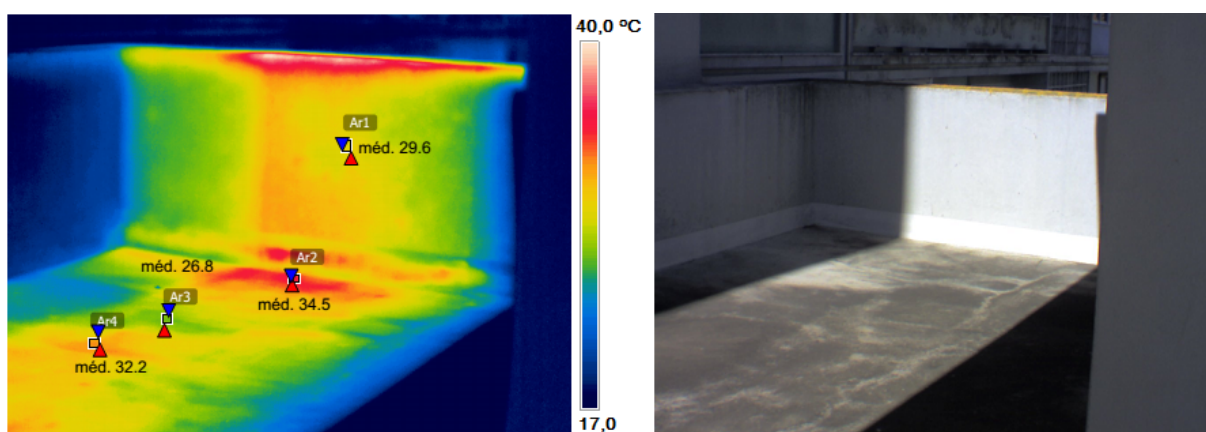


Fig. 6.66: Identificação de empolamentos na cobertura e no elemento emergente pelo método não destrutivo de termografia de infravermelhos (esq.) e correspondente imagem real (dir.).

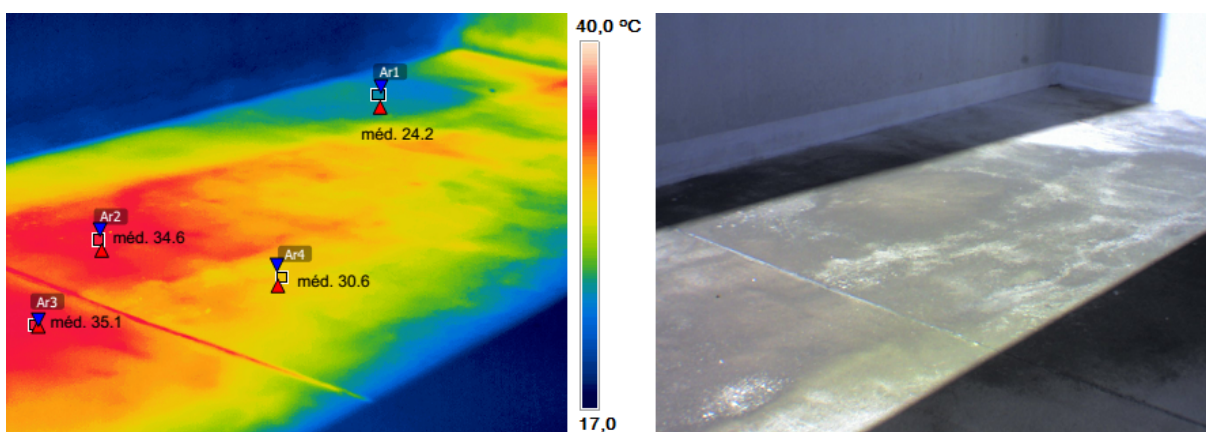


Fig. 6.67: Identificação de empolamentos na cobertura pelo método não destrutivo de termografia de infravermelhos (esq.) e correspondente imagem real (dir.).

No entanto, o objectivo inicial desta inspecção era a detecção de água sob o revestimento de impermeabilização, por ser conhecida a existência de problemas de infiltrações na cobertura. A detecção de água acabou por ser possível neste caso, pois eram visíveis algumas manchas bem delimitadas com temperaturas superficiais mais baixas que as obtidas para as zonas circundantes (figuras 6.68 e 6.69).

Observando-se a figura 6.68, surgiu a dúvida das temperaturas mais baixas obtidas na mancha visível no termograma poderem ser originadas apenas pela cor mais clara do revestimento, e não significarem a existência de água sob o revestimento de impermeabilização. A utilização de um humidímetro teria facilitado a análise, pois permitiria o esclarecimento dessas dúvidas ao indicar se o suporte do revestimento estaria húmido. Todavia, ao analisar a figura 6.70 verifica-se que as zonas com cores mais claras não implicam temperaturas superficiais mais baixas. Nesse termograma é bem visível uma zona de empolamentos com temperaturas superficiais mais elevadas, confirmada por percussão, que se encontra numa área onde a cor do revestimento de impermeabilização é mais clara. Assim, conclui-se que as zonas bem delimitadas com temperaturas superficiais mais baixas (figuras 6.68 e 6.69) podem corresponder efectivamente à presença de água sob o revestimento de impermeabilização.

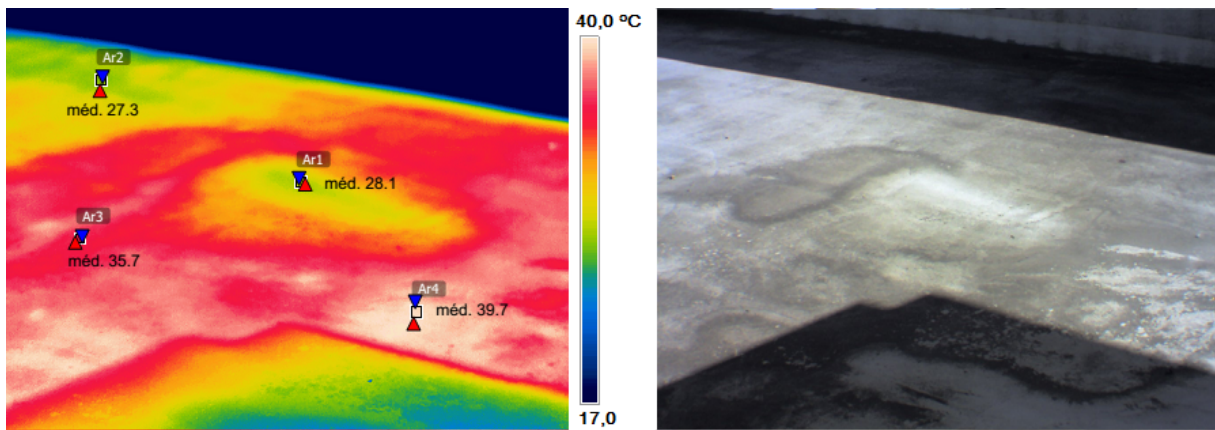


Fig. 6.68: Identificação de água sob o revestimento de impermeabilização pelo método não destrutivo de termografia de infravermelhos - zona 1 (esq.) e correspondente imagem real (dir.).

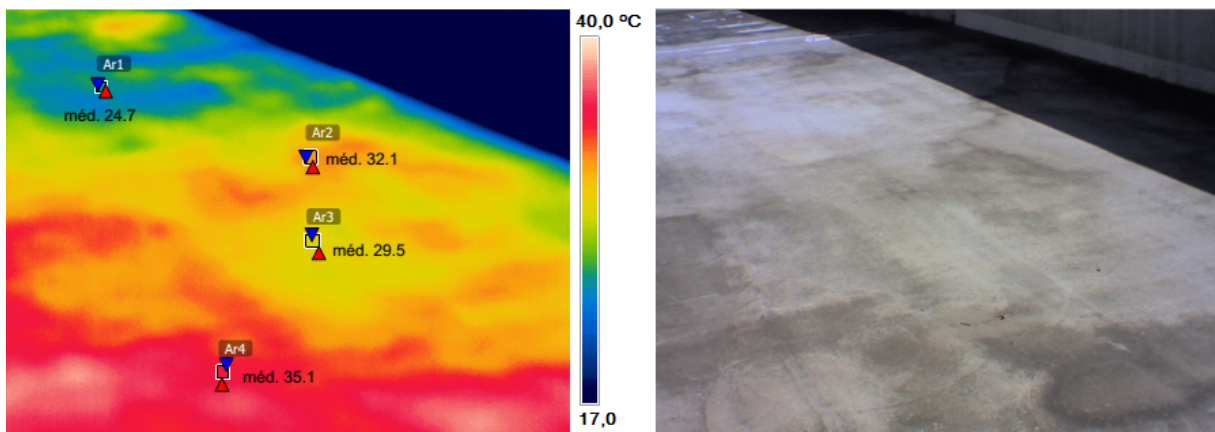


Fig. 6.69: Identificação de água sob o revestimento de impermeabilização pelo método não destrutivo de termografia de infravermelhos - zona 2 (esq.) e correspondente imagem real (dir.).

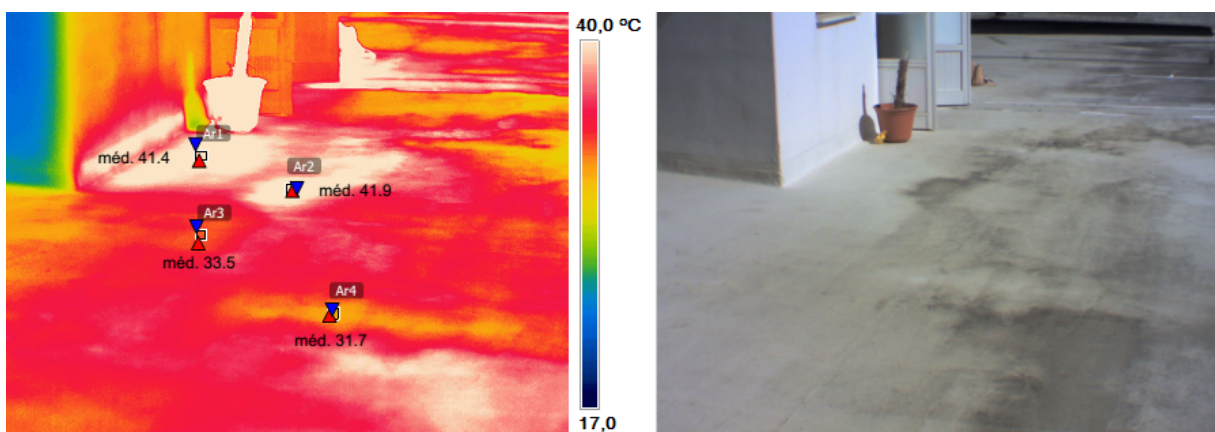


Fig. 6.70: Identificação de empolamentos junto aos acessos para a cobertura pelo método não destrutivo de termografia de infravermelhos (esq.) e correspondente imagem real (dir.).

Capítulo 7

Conclusões

7.1 Considerações finais

O estudo desenvolvido ao longo deste trabalho teve como principal objectivo validar o método não destrutivo de termografia de infravermelhos para a detecção de anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço. No entanto, foram também realizados ensaios em laboratório para caracterizar as propriedades radiativas das membranas de impermeabilização, ensaios esses que permitiram compreender melhor o efeito dessas propriedades na obtenção de uma imagem termográfica e através dos quais se determinaram parâmetros a introduzir na câmara termográfica antes da inspecção, como é o caso da emitância. Nesse âmbito avaliou-se também o efeito da aplicação de tintas reflectantes em membranas de impermeabilização.

Como foi mencionado ao longo do estado do conhecimento, apesar das coberturas em terraço serem cada vez mais usuais em Portugal, ainda surgem com muita frequência anomalias ligadas a este tipo de solução. De forma a reduzir grande parte das anomalias existentes, resultantes essencialmente de erros de concepção e execução, deve-se optar por uma melhoria das disposições construtivas a adoptar e existir uma formação contínua dos projectistas e da mão-de-obra, de forma a acompanhar a evolução dos materiais e das tecnologias de aplicação.

Relativamente à realização da campanha experimental, quer para a caracterização das propriedades radiativas referidas, quer para a detecção de anomalias por termografia de infravermelhos, foi possível retirar algumas conclusões importantes que serão referidas ao longo deste capítulo.

Tanto no ensaio de determinação da reflectância direccionada das amostras de membranas de impermeabilização estudadas neste trabalho, como nos ensaios em que se determinou a reflectância total, verificou-se que a aplicação da tinta reflectante de cor branca permitia sempre uma melhoria significativa da reflectância dessas mesmas amostras. Constatou-se também ao avaliar a reflectância das amostras de betume polímero auto-protegidas com granulado mineral (XC, XB e XEB) que a cor do granulado de protecção também influenciava significativamente a reflectância das amostras em estudo. Quanto mais clara for a cor do granulado da membrana, maior será a reflectância desse revestimento de impermeabilização. Deste modo, pela adopção de granulados mais claros para as membranas de betume polímero, podem-se obter benefícios para a durabilidade do sistema de impermeabilização à vista e para o interior dos espaços construídos, no que diz respeito ao desempenho térmico da cobertura. Assim, ao escolher revestimentos com maior reflectância, obtêm-se temperaturas mais baixas no interior do edifício no período de Verão, estação de arrefecimento, pois há uma diminuição dos ganhos térmicos através da envolvente opaca exterior. No período de Inverno continua a existir uma diminuição dos ganhos térmicos; no entanto, verificou-se que o balanço anual de consumo eléctrico (para temperatura

constante) era positivo.

Quando se procedeu à aplicação de primário, antes da aplicação das tintas reflectantes de cor branca e cor telha, concluiu-se também que este tipo de procedimento permitia uma melhoria da reflectância das amostras onde foi aplicado, apesar dessa melhoria ser muito reduzida. No entanto, quando existiu melhoria da reflectância, esta apenas se verificou nas amostras com tinta reflectante branca.

Na determinação da reflectância direccionada na região do visível, constatou-se que quando existia a aplicação de tintas reflectantes sobre as amostras de membranas de betume polímero auto-protegidas com granulado mineral estas passavam a ter uma componente especular maior, pois a rugosidade da superfície passava a ser mais reduzida. Quando não existia qualquer aplicação das referidas tintas, as amostras protegidas superficialmente com xisto apresentavam um comportamento difuso, ou seja, emitiam a radiação de igual modo em todas as direcções.

No que diz respeito à membrana de betume polímero protegida, superiormente e inferiormente, por filme de polietileno, observou-se um comportamento distinto das diferentes membranas em estudo. Apesar das amostras deste tipo apresentarem um comportamento mais especular, tal como todas as outras amostras, quando existia aplicação de tintas reflectantes, o comportamento mais especular ocorre para menores aberturas de ângulos entre o ponto de leitura e a fonte luminosa. Este facto deve-se ao filme que a membrana possui à superfície, que lhe altera a cor natural para uma cor aparente, diferente em função do ângulo entre o ponto de leitura e a fonte luminosa.

Na determinação da reflectância total, tanto na esfera integradora como no espectrofotómetro, foi possível concluir também que a cor inicial do suporte apenas influenciava a reflectância da amostra quando a tinta aplicada era de cor clara, como por exemplo a tinta branca. Essa influência era mais evidente quando a cor inicial do suporte era escura (cinzenta ou preta).

Relativamente ao ensaio realizado no espectrofotómetro, com vista à determinação da reflectância total (na região dos UV, do visível e nos infravermelhos), constatou-se que todas as tintas reflectantes apresentam melhor comportamento na região dos infravermelhos, ainda que o ensaio tenha incidido apenas numa parte reduzida dessa região (entre os $0.78\mu m$ e os $0.9\mu m$). Apesar da tinta de cor telha prejudicar a reflectância do suporte numa grande parte do visível, quando aplicada em suportes mais claros, resultados obtidos também nos ensaios anteriores, na região dos infravermelhos a aplicação deste tipo de tinta permite sempre uma melhoria dessa propriedade. Este comportamento surge porque na região do visível a tinta influencia a reflectância apenas pela sua cor, enquanto que na região dos infravermelhos o que entra em jogo são as características da própria tinta. Apesar do desempenho destas tintas reflectantes ser melhor no infravermelho, as tintas em estudo continuam a ser eficazes em termos de uma melhoria da reflectância das superfícies face à radiação térmica incidente, pois a radiação infravermelha corresponde a cerca de 52% do espectro da radiação solar.

Para que se tivesse uma ideia dos valores de emitância a introduzir na câmara termográfica antes de qualquer inspecção sobre materiais semelhantes aos das amostras em estudo, determinou-se também esta propriedade utilizando um emissómetro modelo AE.

Na detecção de anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço, geralmente relacionadas com a existência de ar ou com a presença de água entre a membrana e o suporte, demonstrou-se ao longo deste trabalho que a termografia é um excelente método que permite localizar e identificar este tipo de problemas. No entanto, verificou-se que, para se obterem resultados satisfatórios, é necessário criar um fluxo térmico nas superfícies a analisar, quer artificialmente em laboratório através de uma placa de aquecimento, quer por acção da radiação solar nos ensaios *in situ*. Dessa forma, as condições climatéricas de exposição solar e de sombreamento, constituem aspectos que têm de ser tidos em consideração para o agendamento da realização de inspecções com a termografia *in situ*.

Para criar o fluxo térmico nos provetes em laboratório, necessário para a detecção de anomalias através da termografia de infravermelhos, analisaram-se dois métodos de aquecimento com a placa quente: aquecimento por condução e aquecimento por radiação. No entanto, verificou-se que no aquecimento por radiação (método de aquecimento mais próximo do obtido *in situ* através da radiação solar) o diferencial de temperatura entre a temperatura do provete e a temperatura ambiente era muito reduzido, dificultando a identificação das anomalias no provete através da análise termográfica.

Na detecção de empolamentos em laboratório verificou-se que, logo após o aquecimento com a placa quente, as zonas de empolamento se encontravam com temperaturas superficiais mais elevadas em comparação com as zonas mais aderentes adjacentes. Todavia, ao fim de um período de tempo relativamente pequeno após o aquecimento, cerca de 2 minutos, constatou-se que as zonas aderentes apresentavam temperaturas superficiais mais elevadas do que as zonas com espaços de ar sob o revestimento de impermeabilização. Como a zona de empolamento é apenas condicionada pelo comportamento do ar aí existente (devido à descontinuidade entre a membrana e o seu suporte provocada por esse espaço de ar) a temperatura superficial dessas áreas altera-se facilmente quando estas são sujeitas a solicitações de energia térmica, devido à fraca inércia térmica do ar. Por esse motivo, as zonas onde existem empolamentos aquecem e arrefecem mais rapidamente que as zonas mais aderentes contíguas.

Relativamente à detecção da presença de água sob o revestimento de impermeabilização em laboratório, conclui-se que a zona onde o suporte se encontra húmido apresenta temperaturas superficiais mais baixas que as zonas aderentes circundantes. Este comportamento deve-se à elevada inércia térmica da água. Nas áreas onde o suporte fica húmido, devido à elevada inércia térmica, há uma maior absorção de energia, proveniente do aquecimento com a placa, sem que exista uma alteração significativa do seu estado termodinâmico. Assim, como essas zonas demoram mais tempo a aquecer que as zonas aderentes em seu redor, originam-se temperaturas superficiais mais baixas. Contudo, constatou-se que quando a membrana de impermeabilização se encontra ligeiramente molhada à superfície, podem-se originar temperaturas superficiais mais baixas devido a fenómenos de evaporação. Como a evaporação é um fenómeno endotérmico, ou seja, é necessário fornecer-lhe energia para que ele ocorra, existe uma absorção de energia térmica durante o processo nessas zonas, provocando, por esse motivo, um abaixamento das temperaturas superficiais.

Os ensaios realizados em laboratório foram extremamente importantes para a compreensão dos fenómenos que se encontraram *in situ*, quer na análise termográfica dos provetes com anomalias controladas, quer na avaliação de coberturas em condições reais.

As inspeções termográficas realizadas no exterior, no presente estudo, permitiram concluir que o comportamento dos espaços de ar e da presença de água sob a membrana, varia consoante a hora do dia em que se realiza a campanha experimental.

Se a inspeção for realizada no período de aquecimento, ao início da tarde, as zonas onde existem espaços de ar apresentam temperaturas superficiais mais elevadas, enquanto que as zonas onde o suporte estiver húmido apresentam temperaturas superficiais mais baixas. Este fenómeno explica-se pelo facto do ar apresentar uma inércia térmica mais fraca do que a água, como se mencionou para os ensaios em laboratório. Nas zonas de empolamento, o pequeno espaço de ar existente entre o suporte e o revestimento de impermeabilização provoca uma descontinuidade e, assim, a temperatura superficial dessas zonas passa a ser influenciada apenas pelo comportamento do ar aí existente. Como a inércia térmica do ar é reduzida, as zonas de empolamento vão aquecer mais rapidamente em comparação com as zonas aderentes circundantes. No caso da água o comportamento é oposto. Quando o suporte fica humedecido devido à presença da água, este consegue absorver maiores quantidades de energia térmica provenientes do aquecimento, sem que se altere facilmente o seu estado termodinâmico. Assim, as zonas com água sob o revestimento de impermeabilização aquecem mais lentamente que as zonas aderentes adjacentes.

Ao realizar a inspecção no período de arrefecimento, ao início da noite, o comportamento dessas anomalias inverte-se, ou seja, as zonas de empolamentos passam a apresentar temperaturas superficiais mais baixas e as zonas de água sob o revestimento de impermeabilização apresentam temperaturas superficiais mais altas. A explicação desses comportamentos é semelhante à realizada para o período de aquecimento. Neste caso, como os empolamentos apresentam inércia térmica mais fraca, estas zonas libertam mais rapidamente a energia que absorveram durante o aquecimento, originando temperaturas superficiais mais baixas que as zonas mais aderentes contíguas. Relativamente às zonas onde existe água sob o revestimento de impermeabilização, como estas zonas acumulam mais energia ao longo do dia do que as restantes zonas aderentes, vão libertar essa energia mais lentamente, provocando, por esse motivo, temperaturas mais altas à superfície da impermeabilização.

Como foi mencionado ao longo do estado de arte, um dos factores que pode influenciar a imagem térmica obtida pela câmara termográfica é a alteração do ângulo de observação. No entanto, ao longo do desenvolvimento experimental, tanto em laboratório como *in situ*, verificou-se que, mesmo existindo algum erro associado à alteração do ângulo de observação, esse seria mínimo e a identificação das anomalias continuava a ser possível. Esta conclusão importante, associada à vantagem de não ser necessária a utilização do suporte metálico durante as campanhas experimentais, torna este tipo de inspecção a mais viável para a aplicação do método estudado a casos reais.

Durante as inspecções em coberturas *in situ* verificou-se que o método da termografia de infravermelhos apresentava algumas limitações no que diz respeito à detecção de água sob o revestimento de impermeabilização. Durante a inspecção na cobertura da célula experimental C5 constatou-se que quando o suporte da impermeabilização se encontra uniformemente molhado a detecção deste tipo de anomalias não é possível.

7.2 Sugestões para desenvolvimentos futuros

A durabilidade da aplicação de sistemas de pintura com tintas reflectantes sobre sistemas de impermeabilização de coberturas deve ser objecto de avaliação.

No seguimento dos ensaios realizados para a detecção de anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço, utilizando o método não destrutivo de termografia de infravermelhos, seria pertinente voltar a aplicar o método desenvolvido em mais casos de estudo, pois no decorrer deste trabalho apenas foi possível a aplicação do método em duas coberturas *in situ*. No entanto, as inspecções a realizar nas coberturas em condições reais deve ser complementada com a utilização de um húmidímetro, de forma a comprovar os resultados obtidos.

Bibliografia

- ALMEIDA, E. G. (2010). Inspecção termográfica de danos por impacto em laminados compósitos sólidos de matriz polimérica fortalecida com fibras de carbono. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- ALVES, J. (2013). Impermeabilização e isolamento térmico de coberturas em terraço, sistemas construtivos e patologias. Dissertação de Mestrado, ISEL.
- AMADO, M. (2013). *Edifício sustentável - manutenção*. Documento de apoio às aulas de Gestão do Território e Prevenção de Riscos. FCT-UNL.
- ANTÓNIO, D. (2011). Reabilitação de revestimentos de impermeabilização de coberturas em terraço: Estudo experimental da ligação entre membranas novas e envelhecidas. Dissertação de Mestrado, IST.
- AQC (2013). Agence Qualité Construction. Intervention sur une toiture-terrasse. <http://www.qualiteconstruction.com/outils/fiches-renovation/detail/fiche/intervention-sur-toiture-terrasse.html> (acedido em Maio de 2013).
- ASTM (2012). ASTM G173-03. *Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface*.
- AVDELIDIS, N. P. e MOROPOULOU, A. (2003). Emissivity considerations in building thermography. *Energy and Buildings*, 35. pp. 663 - 667.
- BALARAS, C. A. e ARGIRIOU, A. A. (2002). Infrared thermography for buildings diagnostics. *Energy and Buildings*, 34. pp. 171 - 183.
- BARACCANI, D. (2011/2012). *La termografia: una tecnica di controllo non distruttivo*. Elaborato finale di laurea, Università di Bologna. Cesena.
- BARREIRA, E. (2004). Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrótérmico dos edifícios. Dissertação de Mestrado, FEUP.
- BROBERG, P. (2013). Surface crack detection in welds using thermography. *NDT&E International*, 57. pp. 69 - 73.
- CASTRO, A. (2002). Análise da refletância de cores de tintas através da técnica espectrofotométrica. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas.
- CITIES, D. (2014). Localização do edifício de habitação plurifamiliar. <https://www.google.pt/maps/@38.7492645,-9.1435663,124m/data=!3m1!1e3> (acedido em Fevereiro de 2014).

- CORTIZO, E. (2007). *Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- COSTA, M. A. (sd). *Conforto térmico de Verão em edifícios de habitação - Processos de transmissão de calor em regime variável - no contexto climático da Europa do Sul*. Tese de Doutorado, FCT-UNL.
- CRUZ, H. e AGUIAR, J. (2009). *Patologias em pavimentos e cobertura de edifícios*. 3º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios. Porto.
- DIAS, T. (2008). Durabilidade de materiais utilizados nos sistemas de impermeabilização de coberturas planas. Dissertação de Mestrado, FEUP.
- DL (1951). Decreto-lei nº 38382, de 7 de agosto de 1951, *Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU)*. Imprensa nacional - Casa da Moeda. Lisboa, 1988.
- DORNELLES, K. (2008). *Absortância solar de superfícies opacas: Métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas.
- DOW (sd). DOW Building Solutions - Coberturas acessíveis.
<http://building.dow.com/europe/pt/insulate/thermal/invert/project/prot/acess.htm> (acedido em Junho de 2013).
- D&S (sd). *Instruction Manual Emissometer Model AE*.
- FARIA, P. (2011/2012). *Sistemas de revestimento de coberturas planas*. Documento de apoio às aulas de Tecnologia de Revestimentos. FCT-UNL.
- FEITEIRA, J. (2009). Sistemas de impermeabilização de coberturas em terraço com base em produtos líquidos ou pastosos. Dissertação de Mestrado, IST.
- FIGUEIREDO, J. (2012). Levantamento de anomalias nos sistemas impermeabilizantes de coberturas planas. Dissertação de Mestrado, ISEL.
- FLIR (2007). *Manual do utilizador - ThermaCAM reporter*.
- GONÇALVES, L. (2014). Avaliação do desempenho térmico de tintas refletantes por análise termográfica. Dissertação de Mestrado, FCT-UNL.
- GONÇALVES, M., LOPES, J. G., BRITO, J. D., e LOPES, M. D. G. (2005). Características das membranas de impermeabilização de coberturas em terraço. *Engenharia Civil - UM*, (22): pp. 59 – 71.
- HARRISON, H. W. (1996). *Roof and roofing: performance, diagnosis maintenance, repair and the avoidance of defects*. BRE Press.
- HART, J. M. (1991). *A practical guide to infra-red thermography for building surveys*. Construction Research Communications Ltd.
- HENRIQUES, F. M. A. (2011). *Comportamento higrotérmico de edifícios*. FCT-UNL.

- HENRIQUES, F. M. A. e RATO, V. (2004). Avaliação do risco de ocorrência de condensações internas em coberturas planas. *Caderno de Edifícios 03, LNEC*. pp. 117 - 135.
- HITACHI (sda). *Instruction Manual Integrating Sphere*.
- HITACHI (sdb). *Instruction Manual Spectrophotometer Model U3300*.
- IGRA (sd). International Green Roof Association.
http://www.igra-world.com/types_of_green_roofs/index.php (acedido em Agosto de 2013).
- IKEMATSU, P. (2007). Estudo da refletância e sua influência no comportamento térmico de tintas refletivas e convencionais de cores correspondentes. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- IMPERALUM (sda). Detalhes CAD - Impermeabilização e drenagem.
http://www.techitt.com/Homepage/2003_DetalhesCad/2003_DetalhesCad1.php?Caminho=&GrandeTema=Impermeabiliza%E7%E3o%20e%20Drenagem&numero_Cads=3686 (acedido em Fevereiro de 2014).
- IMPERALUM (sdb). Soluções - Projectos de impermeabilização.
<http://www.imperialum.com/default.asp?s=86&sparent=80&sroot=79> (acedido em Junho de 2013).
- IST (sd). Processos e propriedades radiativas. Propriedades radiativas de superfícies.
<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571333436/> (acedido em Fevereiro de 2014).
- LMT (sd). *Manual da esfera integradora LMT RT 500*.
- LNEC (2012). *Documento de Aplicação 29 - POLYSTER 40 e POLYSTER R40, Revestimentos de impermeabilização de coberturas*. LNEC, Lisboa.
- LOPES, J. M. G. (1994a). *Anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço - ITE 33*. LNEC.
- LOPES, J. M. G. (1994b). *Revestimentos de impermeabilização de coberturas em terraço - ITE 34*. LNEC.
- LOPES, J. M. G. (2004). Classificação de coberturas em terraço. Uma abordagem ao tema. *Caderno de Edifícios 03, LNEC*. pp. 87 - 105.
- MACHADO, M. (2009). Estudo experimental da estabilidade dimensional de membranas betuminosas de impermeabilização de coberturas em terraço. Dissertação de Mestrado, IST.
- MALDAGUE, X. P. V. (1994). *Infrared methodology and technology*. Gordon and Breach Science Publishers.
- MALDAGUE, X. P. V. (2001a). *Infrared and thermal testing*. American Society for Nondestructive Testing.
- MALDAGUE, X. P. V. (2001b). *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. John Wiley & Sons.

- MALDAGUE, X. P. V. (2002). Introduction to NDT by active infrared thermography. *Université Laval*. pp. 1 - 17.
- MATIAS, L. (2001). Avaliação do desempenho térmico de protecções reflectantes aplicadas em coberturas inclinadas. Dissertação de Mestrado, UL.
- MENDONÇA, P. (2005). *Habitar sob uma segunda pele: Estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados*. Tese de Doutoramento, UM.
- MINOLTA (sda). *Chromameter CS - 100*.
- MINOLTA (sdb). Konica Minolta - Measuring Instruments.
<http://sensing.konicaminolta.asia/products/ls-100-luminance-meter/>
(acedido em Fevereiro de 2014).
- MODEST, M. F. (2003). *Radiative heat transfer*. Academic press.
- NCCt (1985). *Regras de qualidade de sistemas não-tradicionais de impermeabilização de coberturas e dos seus suportes isolantes*. Trabalho integrado no plano de estudos no domínio de edifícios. LNEC, Lisboa.
- NCCt (2002). *Aplicação laboratorial da análise termográfica para visualização da absorção capilar e da secagem de um provete de parede de alvenaria de tijolo cerâmico furado*. RELATÓRIO 144/02 - Estudo integrado no plano de investigação programada (2001/2004). LNEC.
- NRI (2003). *Aplicação laboratorial de técnicas termográficas e de ultra-sons na detecção de deslocamentos localizados dos revestimentos numa parede de alvenaria de blocos de betão de argila expandida*. RELATÓRIO -/2003. LNEC.
- NRI (2004). *Aplicação da análise termográfica em edifícios antigos na Amieira do Tejo e em Viana do Alentejo*. RELATÓRIO 270/2004 - Projecto FCT nº POCTI/ECM/46323/2002. LNEC.
- PEREIRA, A. C. (sd). A difusividade térmica, a efusividade térmica e a inércia térmica da envolvente dos edifícios.
http://www.get.pt/site_files/publicaes/a_difusividade_trmica1301121906.pdf (acedido em Setembro de 2013).
- RAMOS, A. P. (2008). *Estruturas de Betão Armado II*. Documento de apoio às aulas de Estruturas de Betão Armado II. FCT-UNL.
- RAPOSO, S. (2003). *Coberturas planas de edifícios*. Construlink Press. Oeiras.
- RAPOSO, T. (2009). Durabilidade da construção. estimativa da vida útil de revestimentos de coberturas planas. Dissertação de Mestrado, FEUP.
- REMPEL, A. R. e REMPEL, A. W. (2013). Rocks, clays, water, and salts: Highly durable, infinitely rechargeable, eminently controllable thermal batteries for buildings. *Geosciences*. pp. 63 - 101.
- REUSCH, W. (2013). Visible and ultraviolet spectroscopy.
<http://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/VirtTxtJml/Spectrpy/UV-Vis/spectrum.htm> (acedido em Fevereiro de 2014).

ROCHA, P. (2008). Anomalias em coberturas de terraço e inclinadas. Dissertação de Mestrado, IST.

SANTOS, C. A. P. e MATIAS, L. (2006). *Coefficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente do edifício - ITE 50*. LNEC.

SILVA, J. (2012). Coberturas e fachadas verdes. Dissertação de Mestrado, IST.

SILVA, J. M. e GONÇALVES, P. (2001). Patologias correntes em coberturas planas em Portugal. Congresso Nacional da Construção, IST, Lisboa.

SOUSA, J. (2009). Soluções de reabilitação da impermeabilização de coberturas planas. Dissertação de Mestrado, FEUP.

WALTER, A. (2002). Sistema de classificação para inspeção de impermeabilizações de coberturas em terraço. Dissertação de Mestrado, IST.

WALTER, A., BRITO, J. D., e LOPES, J. G. (2005). Current flat roofs bituminous membranes waterproofing systems - inspection, diagnosis and pathology classification. *Construction and Building Materials*, 19. pp. 233 - 242.

Anexo A

Características técnicas dos equipamentos utilizados

A.1 ThermaCAM P640

Quadro A.1: Características técnicas da ThermaCAM P640 [FLIR, 2007].

Desempenho da formação de imagens	Precisão	$\pm 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 2\%$ de leitura
	Sensibilidade térmica	$< 0,08\text{ }^{\circ}\text{C}$ @ $+ 30\text{ }^{\circ}\text{C}$
	Resolução espacial	<ul style="list-style-type: none">Lente de 40 mm: 0,66 mrad19 mm: 1,3 mrad76 mm: 0,33 mrad
	Zoom electrónico	Zoom de interpolação contínua nas imagens
	Panorâmica	Panorâmica sobre imagens aumentadas
	Optimização da imagem digital	Redução do ruído digital adaptativo
Detector	Tipo de detector	Matriz de Plano Focal (FPA), microbolómetro não refrigerado 640 x 480 pixels
	Amplitude espectral	7,5 – 13 μm
Apresentação das imagens	Monitor	5,6 pol. ; 1000 x 600 pixels
	Visor	800 x 600 pixels
	Amplitude de temperatura do objecto	Sujeito ao modelo da câmara
Ponteiro laser	Classificação	Classe 2
	Tipo	Semicondutor díodo laser AlGaInP, 1 mW, 635 nm (vermelho)

Anexo A. Características técnicas dos equipamentos utilizados

Quadro A.2: Características técnicas da ThermaCAM P640 [FLIR, 2007].

Sistema de energia eléctrica	Tipo de bateria	Bateria de iões de lítio (Li/ion) recarregável
	Tensão da bateria	7,2 V
	Capacidade da bateria	4,4 Ah
	Período de funcionamento da bateria	>3 horas
	Funcionamento CA	Adaptador CA, 90-260 VCA, 50/60 Hz, 12 VCC saída
	Tensão	11 – 16 VCC
	Auto desactivado	A câmara desliga-se após um período de tempo que o utilizador pode definir
Dados ambientais	Amplitude de temperaturas de funcionamento	-15°C a + 50°C
	Amplitude de temperaturas de armazenamento	-40°C a + 70°C
	Humidade (funcionamento e armazenamento)	IEC 68-2-30/24 h 95% humidade relativa + 25°C a + 40°C
	EMC	EN 61000-6-2:2001 (Imunidade) EN 61000-6-3:2001 (Emissão) FCC 47 CFR Parte 15 (Emissão)

Quadro A.3: Características técnicas da ThermaCAM P640 [FLIR, 2007].

Dados físicos	Peso da câmara, excluindo lente e bateria	1,13 kg (2,49 lb.)
	Peso da câmara, incluindo lente de 19 mm, excluindo bateria	1,69 kg (3,72 lb.)
	Peso da câmara, incluindo lente de 40 mm, excluindo bateria	1,56 kg (3,44 lb.)
	Peso da bateria	0,24 kg (0,52 lb.)
	Dimensões da câmara, excl. lente (C x L x A)	281,9 x 144,0 x 146,7 mm
	Dimensões da câmara, incluindo lente de 19mm (C x L x A)	299,3 x 144,0 x 146,7 mm
	Dimensões da câmara, incluindo lente de 40mm (C x L x A)	324,3 x 144,0 x 146,7 mm
	Dimensões da bateria (C x L x A)	140,8 x 46,8 x 28,1 mm
	Dimensões do carregador da bateria (C x L x A)	158,3 x 122,4 x 24,7 mm
	Suporte para tripé	Padrão, ¼" - 20
	Material da caixa	Magnésio
	Material da pega	TPE – Thermoplastic Elastomer Plastics

A.2 Luminómetro CS-100

Quadro A.4: Características técnicas do Luminómetro CS-100 [MINOLTA, sda].

Type	TTL spot colorimeter for measuring light-source and reflected-light color
Receptors	3 silicon photocells filtered to detect primary stimulus values for red, green, and blue light
Spectral responde	Closely matches CIE Standard Observer curves.
Measuring modes and chromatics systems	Absolute color: Yxy (CIE 1931) Color difference: $\pm\Delta$ (Yxy)
Calibration	PRESET: Minolta standard calibration VARI: User-selected calibration reference
Color-difference mode	One memory channel for storing target color values (measured or input); difference from stored values determined by meter and displayed
Optical system	85 mm f/2,8 lens; TTL (through-the-lens) viewing system
Acceptance angle	1°
Field of view	9° (with circular 1° indication)
Focusing distance	1014mm to infinity (minimum of 203mm using optional close-up lens)
Minimum target area	ϕ 14,4mm at 1014mm (1,3mm using optional close-up lens)
Luminance units	cd/m ² or fL selectable
Luminance measuring range	FAST: 0,01 to 299000 cd/m ² (0,01 to 87500 fL) SLOW: 0,01 to 49900 cd/m ² (0,01 to 145 fL)
Accuracy	Luminance (Y): $\pm 2\%$ of reading, ± 1 digit in last-changing display position Chromaticity: $\pm 0,004$ Based on Minolta's standard test methods.
Short-term repeatability	Luminance (Y): $\pm 0,2\%$ of reading, ± 1 digit in last-changing display position Chromaticity (x,y): FAST: Y above 100 cd/m ² : $\pm 0,001$ Y from 48,1 to 99,9 cd/m ² : $\pm 0,002$ Y below 48,0 cd/m ² : below measurement range SLOW: Y above 25,0cd/m ² : $\pm 0,001$ Y from 12,0 to 24,9 cd/m ² : $\pm 0,002$ Y below 11,9 cd/m ² : below measurement range Based on Minolta's standard test methods

Quadro A.5: Características técnicas do Luminómetro CS-100 [MINOLTA, sda].

Displays	External LCD panel: shows digital Y, x, and y values plus operation and error indications Viewfinder LCD panel: shows digital Y value
Data output	1-bit serial, open-collector via Hirose RP17-13RA-12SD connector; remote control possible
Power source	One 9V battery (Eveready 216 or equivalent); external power supply may be used via data-output terminal
Operating temperature	0 to 40 °C (32 to 104°F) relative humidity less than 85% at 35°C with no condensation
Storage temperature	-20 to 55°C with no condensation (-4 to 131°F)
Dimensions	208 x 79 x 154mm (8 3/16 x 3 1/8 x 6 1/16 in.)
Weight	890g (31 3/16 oz.) without battery
Standard accessories	Lens cap, protective filter, eyepiece cap, neutral density eyepiece filter, digital output terminal cover, battery, chroma chart, case
Optional accessories	Close-up lenses, DP-101, white calibration plates, long eye-relief eyepiece

A.3 Esfera integradora LMT RT 500

Quadro A.6: Características técnicas da Esfera integradora LMT RT 500 [LMT, sd].

Integrating sphere	Diameter	500 mm
	<p>Is made of aluminium and mounted on stable aluminium base. The inner sphere wall is painted with special LMT-photometer paint which has diffuse reflectance characteristic and spectral reflectance $\rho(\lambda) \approx 0,8$. The sphere construction is according to DIN 5036 part 3 and ISO 5740-1982.</p>	
Illuminant sources	<p>Both illuminant sources for ρ and τ measurement contain a halogen incandescent lamp 6V/10W (OSRAM 64 225). Both ρ and τ illuminant sources also include Si-photoelements which are located behind a beam splitter for electronic control of constant luminous flux output from the halogen lamp. The electric power source and control circuits are integrated in the RT 500 (measuring console). The luminous flux of the halogen lamp changes less than 0.1 % when the line voltage changes about ± 10 %.</p>	
Measuring console	<p>The measuring console contains the power supply, the luminous flux control circuit for the illuminant sources and the evaluating and display electronics for the measurement signal. The display range is 0.0 % to 100.0%. The decimal point in the digital display has a fixed position. The brightness of the display can be adjusted to the surrounding illuminance by means of the knob "Dim". For calibration of reflectance measurement, a working reflectance standard is necessary.</p>	

A.4 Espectrofotômetro HITACHI modelo U-3300

Quadro A.7: Características técnicas do espectrofotômetro HITACHI modelo U-3300 [HITACHI, sdb].

Effective wavelength range	190 - 900 nm
Monochromator	Seya - Namioka Type monochromator Aberration – corrected concave diffraction grating used
Detector	Photomultiplier
Sample compartment	Inside dimensions 120(W) x 300(D) x 140(H) Distance between the reference light beam and the sample light beam : 100 mm
Wavelength display	In steps of 0,01 nm
Slit width display	5; 4; 2; 1; 0,5; 0,1 nm
Wavelength accuracy	± 0,3 nm
Wavelength setting repeatability	± 0,05 nm
Wavelength drive speed	0,3; 3; 15; 30; 60; 120; 300; 600; 1200; 1800 nm/min and auto Go to λ : 4500 nm/min
Light source	Ultraviolet region : Deuterium discharge tube (one touch installation) Visible region : Tungsten iodine lamp (one touch installation)
Light source changeover point	Automatic changeover linked with wavelength Changeover wavelength freely selectable within a range of 325 – 370 nm
Photometric method	Double beam direct ratio method Owing to Hitachi's original differential feedback method, negative absorbance is measurable.

Quadro A.8: Características técnicas do espectrofotômetro HITACHI modelo U-3300 [HITACHI, sdb].

Measurement mode	Absorbance (Abs), transmittance (%T), reflectance (%R), reference energy (E(R)) and sample energy (E(S)) modes Conversion mode Kubelka – Munk F(R), ϵ , $\log\epsilon$, Kcm^{-1} , T Hz, eV
Photometric range	Absorbance U - 3000: - 2,0 to 3,0 U - 3300: - 2,0 to 4,0 Transmittance, reflectance 0 – 999,9
Photometric accuracy	0 – 0,5 Abs \pm 0,002 Abs 0,5 – 1,0 Abs \pm 0,004 Abs As checked with NBS 930 filter
Baseline correction	3 channels 1 channels for a system baseline 2 channels for a user base line
Baseline flatness	Less than \pm 0,001 Abs Slit width 2 nm
Baseline stability	Less than 0,0004 Abs/hr 340 nm, when measured 2 hours after energization
Personal computer	Hard disk drive. Floppy disk drive Display 14inch, color CRT Mouse Keyboard
Software	MS – DOS MS – WINDOWS Spectrophotometer system software
Line voltage	AC100, 115, 220, 230, 240 V
Line frequency	50/60 Hz
Power consumption	400 V A (Main unit of the spectrophotometer)
Dimensions	670(W) x 680(D) x 330(H) mm (Main unit of the spectrophotometer)
Weight	50 Kg

A.5 Emissômetro modelo AE

Quadro A.9: Características técnicas do emissômetro modelo AE [D&S, sd].

READOUT	The D&S Scaling Digital Voltmeter, Model RD1, or a high impedance voltmeter with a resolution of 0.01 millivolts is required.
OUTPUT	2.4 millivolts, nominal, with a sample emittance of 0.9 and a sample temperature of 78F (25C).
OUTPUT IMPEDANCE	150 ohms, nominal.
LINEARITY	The detector output is linear with emittance to within +/- 0.01 units.
TIME CONSTANT	10 seconds, nominal (time to reach 63% of final value).
HEAT SINK	A heat sink is provided to keep both a calibration standard and the material to be measured at the same temperature.
SAMPLE TEMPERATURE	130 F Maximum. Sample and calibration standards should be at the same temperature.
DRIFT	The output will change with time due to changes in ambient conditions. This effect is negligible over the time required to make the measurement.
STANDARD SAMPLES	Four calibration standards are provided with the emissometer. Two high emittance standards and two low emittance. One set of high and low emittance standards are used as working calibration standards and the other set should be stored for reference. The working standards are checked periodically against the reference standards to detect degradation.
MODEL AE/RD1	includes the Model AE plus the Scaling Digital Voltmeter, Model RD1 for direct reading of emittance.

Anexo B

Resultados obtidos nos ensaios realizados

B.1 Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

Quadro B.1: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

Tipo Provete	nº Provete	0º / 0º			0º / 15º			15º / 0º		
		x	y	L	x	y	L	x	y	L
Referências	Padrao branco (luminância)			1930,000			1570,000			1640,000
				1940,000			1560,000			1620,000
				1940,000			1560,000			1620,000
XC	1	0,450	0,414	294,000	0,449	0,416	236,000	0,449	0,415	227,000
				295,000			236,000			226,000
				294,000			236,000			226,000
	2	0,450	0,414	305,000	0,450	0,415	238,000	0,499	0,415	225,000
				306,000			237,000			223,000
				305,000			238,000			224,000
XC/BR	1	0,456	0,412	1360,000	0,457	0,412	1290,000	0,457	0,412	1250,000
				1380,000			1290,000			1250,000
				1380,000			1290,000			1250,000
	2	0,456	0,412	1370,000	0,457	0,412	1290,000	0,457	0,412	1250,000
				1380,000			1290,000			1250,000
				1380,000			1290,000			1250,000
XC/TLH	1	0,541	0,394	381,000	0,547	0,391	334,000	0,545	0,392	328,000
				379,000			334,000			328,000
				379,000			334,000			328,000
	2	0,543	0,393	367,000	0,548	0,391	328,000	0,546	0,392	321,000
				363,000			328,000			322,000
				368,000			328,000			321,000
XB	1	0,454	0,412	710,000	0,454	0,413	599,000	0,454	0,413	573,000
				709,000			599,000			573,000
				708,000			599,000			575,000
	2	0,453	0,412	716,000	0,454	0,413	604,000	0,454	0,414	574,000
				711,000			603,000			574,000
				709,000			603,000			573,000
XB/BR	1	0,457	0,412	1410,000	0,458	0,412	1320,000	0,458	0,413	1290,000
				1400,000			1320,000			1290,000
				1410,000			1310,000			1290,000
	2	0,457	0,412	1370,000	0,457	0,412	1300,000	0,457	0,413	1270,000
				1370,000			1300,000			1270,000
				1370,000			1290,000			1280,000

Anexo B. Resultados obtidos nos ensaios realizados

Quadro B.2: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

Tipo Provete	nº Provete	0º / 30º			30º / 0º			0º / 45º			x
		x	y	L	x	y	L	x	y	L	
Referências	Padrao branco (luminância)			1420,000			1340,000			1370,000	
				1410,000			1330,000			1370,000	
				1410,000			1330,000			1370,000	
XC	1	0,449	0,416	213,000	0,448	0,416	185,000	0,449	0,416	199,000	0,449
				213,000			185,000			199,000	
				213,000			185,000			199,000	
	2	0,450	0,414	207,000	0,449	0,416	181,000	0,448	0,416	194,000	0,450
				207,000			180,000			194,000	
				207,000			180,000			194,000	
XC/BR	1	0,458	0,413	1260,000	0,458	0,412	1130,000	0,458	0,412	1220,000	0,459
				1260,000			1130,000			1220,000	
				1260,000			1130,000			1220,000	
	2	0,457	0,413	1270,000	0,458	0,412	1140,000	0,458	0,412	1230,000	0,458
				1270,000			1140,000			1230,000	
				1280,000			1140,000			1230,000	
XC/TLH	1	0,553	0,398	314,000	0,551	0,390	287,000	0,557	0,389	300,000	0,554
				314,000			287,000			300,000	
				314,000			286,000			300,000	
	2	0,553	0,390	312,000	0,550	0,391	289,000	0,557	0,389	297,000	0,554
				312,000			289,000			297,000	
				312,000			288,000			297,000	
XB	1	0,455	0,413	564,000	0,455	0,413	502,000	0,456	0,413	527,000	0,456
				565,000			502,000			527,000	
				565,000			503,000			526,000	
	2	0,454	0,413	578,000	0,454	0,413	506,000	0,455	0,413	554,000	0,455
				579,000			505,000			554,000	
				578,000			503,000			554,000	
XB/BR	1	0,459	0,413	1300,000	0,459	0,413	1150,000	0,460	0,413	1250,000	0,460
				1300,000			1140,000			1250,000	
				1300,000			1140,000			1250,000	
	2	0,458	0,413	1290,000	0,458	0,412	1170,000	0,459	0,413	1260,000	0,459
				1280,000			1160,000			1260,000	
				1280,000			1160,000			1260,000	

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

Quadro B.3: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

Tipo Provete	nº Provete	45º / 0º			0º / 60º			60º / 0º		
		x	y	L	x	y	L	x	y	L
Referências	Padrao branco (luminância)			1050,000			1160,000			728,000
				1060,000			1150,000			722,000
				1060,000			1140,000			721,000
XC	1	0,449	0,416	150,000	0,449	0,416	187,000	0,447	0,416	106,000
				149,000			187,000			106,000
				150,000			187,000			107,000
	2	0,450	0,415	142,000	0,449	0,416	179,000	0,448	0,415	100,000
				142,000			179,000			100,000
				142,000			179,000			100,000
XC/BR	1	0,459	0,412	937,000	0,458	0,412	1100,000	0,459	0,412	645,000
				936,000			1100,000			646,000
				937,000			1100,000			651,000
	2	0,458	0,412	947,000	0,458	0,412	1120,000	0,458	0,413	669,000
				948,000			1110,000			668,000
				949,000			1110,000			668,000
XC/TLH	1	0,554	0,390	233,000	0,557	0,390	267,000	0,556	0,390	162,000
				233,000			267,000			162,000
				233,000			267,000			162,000
	2	0,554	0,390	234,000	0,558	0,389	269,000	0,556	0,390	164,000
				234,000			269,000			164,000
				233,000			270,000			164,000
XB	1	0,456	0,413	403,000	0,457	0,413	458,000	0,456	0,414	277,000
				403,000			457,000			277,000
				403,000			457,000			277,000
	2	0,455	0,413	403,000	0,455	0,414	505,000	0,455	0,413	271,000
				403,000			505,000			271,000
				402,000			505,000			271,000
XB/BR	1	0,460	0,413	950,000	0,460	0,412	1150,000	0,460	0,413	662,000
				950,000			1150,000			661,000
				951,000			1150,000			662,000
	2	0,459	0,412	979,000	0,459	0,412	1160,000	0,459	0,412	684,000
				979,000			1160,000			684,000
				978,000			1160,000			684,000

Anexo B. Resultados obtidos nos ensaios realizados

Quadro B.4: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

Tipo Provete	nº Provete	75º / 0º		
		x	y	L
Referências	Padrao branco (luminância)			367,000
				361,000
				356,000
XC	1	0,447	0,416	60,100
				60,400
				60,300
	2	0,446	0,416	56,700
				56,800
				56,800
XC/BR	1	0,458	0,412	331,000
				331,000
				331,000
	2	0,458	0,412	347,000
				347,000
				347,000
XC/TLH	1	0,553	0,391	89,500
				89,400
				89,300
	2	0,553	0,391	86,400
				86,600
				86,300
XB	1	0,456	0,412	139,000
				141,000
				141,000
	2	0,457	0,412	138,000
				139,000
				138,000
XB/BR	1	0,459	0,413	331,000
				330,000
				331,000
	2	0,458	0,413	350,000
				350,000
				349,000

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

Quadro B.5: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

Tipo Provete	nº Provete	0º / 0º			0º / 15º			15º / 0º		
		x	y	L	x	y	L	x	y	L
XB/TLH	1	0,546	0,393	361,000	0,551	0,390	320,000	0,549	0,391	320,000
				361,000			319,000			320,000
				361,000			320,000			320,000
	2	0,546	0,392	363,000	0,550	0,391	325,000	0,550	0,390	317,000
				363,000			324,000			317,000
				363,000			324,000			318,000
XEB	1	0,467	0,417	840,000	0,469	0,417	685,000	0,469	0,417	688,000
				838,000			685,000			688,000
				841,000			686,000			688,000
	2	0,466	0,416	858,000	0,469	0,416	710,000	0,469	0,416	713,000
				869,000			708,000			711,000
				864,000			708,000			713,000
XEB/BR	1	0,458	0,413	1370,000	0,459	0,413	1260,000	0,459	0,413	1240,000
				1360,000			1260,000			1230,000
				1370,000			1260,000			1230,000
	2	0,459	0,412	1410,000	0,459	0,413	1320,000	0,459	0,413	1280,000
				1410,000			1310,000			1280,000
				1410,000			1310,000			1270,000
XEB/TLH	1	0,546	0,392	366,000	0,590	0,390	330,000	0,549	0,391	317,000
				365,000			330,000			316,000
				365,000			330,000			315,000
	2	0,545	0,393	370,000	0,549	0,391	331,000	0,550	0,390	319,000
				369,000			330,000			319,000
				369,000			329,000			318,000
ASF	1	0,457	0,413	539,000	0,456	0,410	295,000	0,456	0,411	336,000
				533,000			291,000			339,000
				532,000			291,000			340,000
	2	0,458	0,413	568,000	0,454	0,410	272,000	0,454	0,412	373,000
				570,000			266,000			368,000
				558,000			267,000			371,000

Anexo B. Resultados obtidos nos ensaios realizados

Quadro B.6: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

Tipo Provete	nº Provete	0º / 30º			30º / 0º			0º / 45º		
		x	y	L	x	y	L	x	y	L
XB/TLH	1	0,555	0,390	307,000	0,553	0,390	285,000	0,558	0,389	296,000
				307,000			284,000			296,000
				307,000			284,000			296,000
	2	0,554	0,390	314,000	0,553	0,390	282,000	0,557	0,389	302,000
				314,000			282,000			302,000
				314,000			282,000			302,000
XEB	1	0,471	0,417	640,000	0,471	0,417	602,000	0,471	0,417	594,000
				639,000			601,000			594,000
				638,000			600,000			594,000
	2	0,469	0,417	660,000	0,469	0,417	628,000	0,470	0,417	614,000
				660,000			627,000			614,000
				659,000			628,000			614,000
XEB/BR	1	0,459	0,413	1250,000	0,459	0,413	1110,000	0,460	0,413	1240,000
				1260,000			1110,000			1240,000
				1260,000			1110,000			1240,000
	2	0,460	0,413	1310,000	0,460	0,412	1140,000	0,461	0,413	1280,000
				1310,000			1140,000			1270,000
				1310,000			1140,000			1270,000
XEB/TLH	1	0,553	0,390	317,000	0,553	0,389	277,000	0,556	0,389	308,000
				317,000			276,000			308,000
				317,000			276,000			308,000
	2	0,553	0,390	320,000	0,554	0,389	279,000	0,556	0,389	311,000
				319,000			278,000			311,000
				319,000			278,000			311,000
ASF	1	0,456	0,407	93,800	0,454	0,408	99,000	0,457	0,408	34,200
				93,400			98,400			34,300
				93,200			98,500			34,200
	2	0,453	0,408	85,100	0,454	0,409	123,000	0,455	0,412	37,000
				85,000			122,000			36,900
				85,200			122,000			36,900

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

Quadro B.7: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

Tipo Provete	nº Provete	45º / 0º			0º / 60º			60º / 0º		
		x	y	L	x	y	L	x	y	L
XB/TLH	1	0,554	0,390	237,000	0,558	0,389	272,000	0,556	0,389	166,000
				237,000			272,000			166,000
				237,000			272,000			166,000
	2	0,556	0,389	231,000	0,556	0,389	281,000	0,555	0,389	164,000
				231,000			280,000			165,000
				231,000			280,000			165,000
XEB	1	0,471	0,417	493,000	0,471	0,417	563,000	0,471	0,416	338,000
				493,000			563,000			337,000
				493,000			563,000			337,000
	2	0,470	0,416	517,000	0,471	0,415	578,000	0,470	0,416	352,000
				516,000			578,000			352,000
				516,000			578,000			353,000
XEB/BR	1	0,460	0,413	915,000	0,460	0,413	1110,000	0,460	0,412	626,000
				915,000			1110,000			625,000
				915,000			1110,000			624,000
	2	0,460	0,413	931,000	0,461	0,413	1150,000	0,461	0,412	642,000
				932,000			1150,000			645,000
				931,000			1150,000			644,000
XEB/TLH	1	0,553	0,390	247,000	0,557	0,389	279,000	0,555	0,389	174,000
				247,000			280,000			174,000
				247,000			279,000			174,000
	2	0,556	0,389	236,000	0,557	0,389	280,000	0,556	0,390	172,000
				235,000			280,000			163,000
				235,000			280,000			163,000
ASF	1	0,456	0,407	34,900	0,458	0,407	21,200	0,456	0,408	13,500
				34,300			21,300			13,500
				34,200			21,200			13,500
	2	0,456	0,408	36,800	0,457	0,411	29,000	0,457	0,406	14,100
				36,900			29,000			14,100
				36,800			29,100			14,300

Anexo B. Resultados obtidos nos ensaios realizados

Quadro B.8: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

Tipo Provete	nº Provete	75º / 0º		
		x	y	L
XB/TLH	1	0,552	0,391	90,900
				91,100
				90,900
	2	0,550	0,392	90,400
				90,300
				90,400
XEB	1	0,470	0,417	182,000
				182,000
				182,000
	2	0,468	0,417	188,000
				188,000
				188,000
XEB/BR	1	0,459	0,413	326,000
				326,000
				327,000
	2	0,460	0,413	325,000
				327,000
				327,000
XEB/TLH	1	0,553	0,390	91,700
				89,300
				90,000
	2	0,553	0,390	83,600
				84,300
				84,200
ASF	1	0,453	0,412	7,920
				7,940
				7,940
	2	0,454	0,411	8,630
				8,630
				8,580

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

Quadro B.9: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

Tipo Provete	nº Provete	0º / 0º			0º / 15º			15º / 0º		
		x	y	L	x	y	L	x	y	L
ASF/BR	1	0,457	0,412	1460,000	0,457	0,412	1350,000	0,457	0,412	1330,000
				1460,000			1340,000			1330,000
				1450,000			1340,000			1330,000
	2	0,456	0,412	1410,000	0,456	0,412	1310,000	0,457	0,412	1290,000
				1420,000			1310,000			1290,000
				1410,000			1300,000			1290,000
ASF/TLH	1	0,531	0,396	436,000	0,538	0,393	369,000	0,535	0,394	382,000
				435,000			368,000			381,000
				436,000			369,000			381,000
	2	0,530	0,960	448,000	0,537	0,394	383,000	0,535	0,394	386,000
				447,000			383,000			386,000
				446,000			385,000			385,000
PVC	1	0,456	0,410	801,000	0,454	0,410	507,000	0,453	0,411	473,000
				798,000			513,000			471,000
				772,000			516,000			471,000
	2	0,455	0,410	705,000	0,454	0,410	526,000	0,453	0,411	468,000
				696,000			525,000			466,000
				695,000			525,000			465,000
Referências	Padrao branco (luminância)			1890			1540			1690
				1910			1530			1530
				1900			1530			1530

Anexo B. Resultados obtidos nos ensaios realizados

Quadro B.10: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

Tipo Provete	nº Provete	0º / 30º			30º / 0º			0º / 45º		
		x	y	L	x	y	L	x	y	L
ASF/BR	1	0,458	0,413	1290,000	0,458	0,412	1170,000	0,458	0,413	1230,000
				1290,000			1170,000			1230,000
				1270,000			1170,000			1230,000
	2	0,457	0,412	1270,000	0,457	0,412	1130,000	0,458	0,412	1200,000
				1270,000			1130,000			1200,000
				1270,000			1130,000			1200,000
ASF/TLH	1	0,550	0,391	327,000	0,544	0,392	316,000	0,557	0,390	300,000
				327,000			316,000			300,000
				327,000			315,000			300,000
	2	0,548	0,391	336,000	0,546	0,391	310,000	0,558	0,389	304,000
				336,000			309,000			304,000
				336,000			309,000			304,000
PVC	1	0,454	0,411	401,000	0,454	0,411	354,000	0,455	0,411	370,000
				402,000			353,000			371,000
				402,000			354,000			371,000
	2	0,454	0,411	411,000	0,454	0,411	371,000	0,455	0,411	381,000
				412,000			371,000			381,000
				412,000			370,000			382,000
Referências	Padrao branco (luminância)			1430			1310			1380
				1420			1320			1370
				1420			1320			1370

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

Quadro B.11: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

Tipo Provete	nº Provete	45° / 0°			0° / 60°			60° / 0°		
		x	y	L	x	y	L	x	y	L
ASF/BR	1	0,458	0,412	953,000	0,459	0,412	1110,000	0,458	0,412	669,000
				951,000			1110,000			670,000
				952,000			1110,000			670,000
	2	0,458	0,418	919,000	0,458	0,412	1080,000	0,458	0,412	631,000
				921,000			1080,000			637,000
				923,000			1080,000			639,000
ASF/TLH	1	0,553	0,390	244,000	0,560	0,390	266,000	0,558	0,390	166,000
				244,000			266,000			166,000
				245,000			266,000			167,000
	2	0,554	0,390	240,000	0,559	0,389	281,000	0,560	0,389	164,000
				240,000			281,000			164,000
				241,000			282,000			165,000
PVC	1	0,455	0,411	284,000	0,456	0,412	319,000	0,455	0,411	196,000
				284,000			322,000			196,000
				284,000			322,000			196,000
	2	0,455	0,411	294,000	0,456	0,411	339,000	0,455	0,411	198,000
				294,000			340,000			198,000
				294,000			339,000			198,000
Referências	Padrao branco (luminância)			1060			1160			719
				1060			1160			714
				1060			1160			714

Anexo B. Resultados obtidos nos ensaios realizados

Quadro B.12: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

Tipo Provete	nº Provete	75º / 0º		
		x	y	L
ASF/BR	1	0,458	0,413	345,000
				346,000
				347,000
	2	0,457	0,413	317,000
				317,000
				316,000
ASF/TLH	1	0,558	0,391	87,100
				87,400
				87,500
	2	0,560	0,390	82,800
				82,800
				82,800
PVC	1	0,454	0,412	86,100
				86,100
				86,600
	2	0,453	0,412	86,500
				86,900
				87,000
Referências	Padrao branco (luminância)			346
				339
				340

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

Quadro B.13: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

Tipo Provete	nº Provete	0º / 0º			0º / 15º			15º / 0º		
		x	y	L	x	y	L	x	y	L
Referências	Padrao branco (luminância)			1480,000			1340,000			1370,000
				1500,000			1350,000			1370,000
				1490,000			1360,000			1360,000
XC/BR_P	1	0,456	0,414	1170,000	0,458	0,414	1260,000	0,457	0,415	1130,000
				1190,000			1290,000			1140,000
				1180,000			1300,000			1140,000
XC/TLH_P	1	0,533	0,396	323,000	0,538	0,395	367,000	0,536	0,395	304,000
				321,000			367,000			306,000
				319,000			368,000			305,000
ASF/BR_P	1	0,456	0,414	1240,000	0,456	0,415	1190,000	0,456	0,415	1140,000
				1220,000			1180,000			1140,000
				1210,000			1190,000			1150,000
ASF/TLH_P	1	0,518	0,399	410,000	0,527	0,397	367,000	0,524	0,398	372,000
				409,000			366,000			372,000
				410,000			368,000			371,000
Referências	Padrao branco (luminância)			1490			1310			1410
				1480			1310			1400
				1480			1310			1410

Anexo B. Resultados obtidos nos ensaios realizados

Quadro B.14: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

Tipo Provete	nº Provete	0º / 30º			30º / 0º			0º / 45º		
		x	y	L	x	y	L	x	y	L
Referências	Padrao branco (luminância)			1190,000			1030,000			1170,000
				1190,000			1040,000			1170,000
				1190,000			1040,000			1160,000
XC/BR_P	1	0,457	0,415	1090,000	0,457	0,415	966,000	0,458	0,415	1110,000
				1090,000			969,000			1100,000
				1080,000			967,000			1110,000
XC/TLH_P	1	0,547	0,393	270,000	0,544	0,394	245,000	0,554	0,392	265,000
				271,000			246,000			266,000
				270,000			244,000			266,000
ASF/BR_P	1	0,456	0,415	1090,000	0,456	0,415	969,000	0,456	0,415	1100,000
				1090,000			974,000			1100,000
				1090,000			976,000			1100,000
ASF/TLH_P	1	0,538	0,395	306,000	0,536	0,395	279,000	0,553	0,392	275,000
				309,000			281,000			277,000
				310,000			280,000			277,000
Referências	Padrao branco (luminância)			1170			1080			1160
				1170			1070			1150
				1170			1080			1160

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

Quadro B.15: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

Tipo Provete	nº Provete	45° / 0°			0° / 60°			60° / 0°		
		x	y	L	x	y	L	x	y	L
Referências	Padrao branco (luminância)			861,000			895,000			456,000
				859,000			880,000			468,000
				862,000			852,000			461,000
XC/BR_P	1	0,458	0,415	845,000	0,457	0,416	789,000	0,457	0,416	458,000
				846,000			818,000			455,000
				847,000			833,000			453,000
XC/TLH_P	1	0,552	0,393	202,000	0,557	0,393	192,000	0,555	0,393	106,000
				202,000			189,000			106,000
				202,000			189,000			106,000
ASF/BR_P	1	0,457	0,415	838,000	0,457	0,416	796,000	0,456	0,416	435,000
				836,000			807,000			436,000
				840,000			803,000			438,000
ASF/TLH_P	1	0,549	0,393	208,000	0,557	0,392	192,000	0,555	0,392	108,000
				208,000			190,000			109,000
				208,000			190,000			105,000
Referências	Padrao branco (luminância)			859			895			461
				871			880			454
				872			860			452

Anexo B. Resultados obtidos nos ensaios realizados

Quadro B.16: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

Tipo Provete	nº Provete	75º / 0º		
		x	y	L
Referências	Padrao branco (luminância)			287,000
				287,000
				290,000
XC/BR_P	1	0,458	0,415	297,000
				300,000
				299,000
XC/TLH_P	1	0,554	0,393	70,500
				70,600
				70,600
ASF/BR_P	1	0,456	0,415	275,000
				275,000
				275,000
ASF/TLH_P	1	0,559	0,391	69,300
				68,900
				68,700
Referências	Padrao branco (luminância)			294
				287
				287

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

Quadro B.17: Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

$\rho_{\text{calibrada}}$ do padrão (%)	96,30%
---	--------

Tipo Provete	0°/0°*			0°/15°			15°/0°		
	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)
Padrao branco (medição inicial)	1936,667			1563,333			1626,667		
XC 1	294,333	14,775	15,052	236,000	14,678	14,730	226,333	13,580	13,510
XC 2	305,333	15,328		237,667	14,782		224,000	13,440	
XC/BR 1	1373,333	68,941	69,025	1290,000	80,233	80,233	1250,000	75,000	75,000
XC/BR 2	1376,667	69,108		1290,000	80,233		1250,000	75,000	
XC/TLH 1	379,667	19,059	18,716	334,000	20,773	20,587	328,000	19,680	19,480
XC/TLH 2	366,000	18,373		328,000	20,400		321,333	19,280	
XB 1	709,000	35,592	35,667	599,000	37,255	37,390	573,667	34,420	34,420
XB 2	712,000	35,742		603,333	37,525		573,667	34,420	
XB/BR 1	1406,667	70,614	69,694	1316,667	81,891	81,269	1290,000	77,400	76,900
XB/BR 2	1370,000	68,774		1296,667	80,647		1273,333	76,400	
XB/TLH 1	361,000	18,122	18,172	319,667	19,882	20,027	320,000	19,200	19,120
XB/TLH 2	363,000	18,223		324,333	20,172		317,333	19,040	
XEB 1	839,667	42,151	42,754	685,333	42,625	43,351	688,000	41,280	42,010
XEB 2	863,667	43,356		708,667	44,076		712,333	42,740	

Anexo B. Resultados obtidos nos ensaios realizados

Quadro B.18: Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

$\rho_{\text{calibrada}}$ do padrão (%)	96,30%
---	--------

Tipo Provete	0° / 30°			30° / 0°			0° / 45°		
	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)
Padrao branco (medição inicial)	1413,333			1333,333			1370,000		
XC 1	213,000	14,462	14,258	185,000	13,446	13,276	199,000	13,971	13,796
XC 2	207,000	14,055		180,333	13,106		194,000	13,620	
XC/BR 1	1260,000	85,550	86,002	1130,000	82,128	82,491	1220,000	85,652	86,003
XC/BR 2	1273,333	86,455		1140,000	82,854		1230,000	86,354	
XC/TLH 1	314,000	21,320	21,252	286,667	20,835	20,907	300,000	21,062	20,957
XC/TLH 2	312,000	21,184		288,667	20,980		297,000	20,851	
XB 1	564,667	38,339	38,803	502,333	36,509	36,594	526,667	36,975	37,935
XB 2	578,333	39,267		504,667	36,679		554,000	38,894	
XB/BR 1	1300,000	88,266	87,700	1143,333	83,097	83,823	1250,000	87,758	88,109
XB/BR 2	1283,333	87,134		1163,333	84,550		1260,000	88,460	
XB/TLH 1	307,000	20,844	21,082	284,333	20,665	20,580	296,000	20,781	20,992
XB/TLH 2	314,000	21,320		282,000	20,496		302,000	21,202	
XEB 1	639,000	43,386	44,088	601,000	43,680	44,649	594,000	41,703	42,405
XEB 2	659,667	44,789		627,667	45,618		614,000	43,107	

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

Quadro B.19: Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

$\rho_{\text{calibrada}}$ do padrão (%)	96,30%
---	--------

Tipo Provete	45 ° / 0 °			0 ° / 60 °			60 ° / 0 °		
	$L_{\text{média}}$ (cd/m^2)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m^2)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m^2)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)
Padrao branco (medição inicial)	1056,667			1150,000			723,667		
XC 1	149,667	13,618	13,270	187,000	15,591	15,258	106,333	14,229	13,805
XC 2	142,000	12,921		179,000	14,924		100,000	13,381	
XC/BR 1	936,667	85,229	85,745	1100,000	91,714	92,270	647,333	86,621	88,026
XC/BR 2	948,000	86,261		1113,333	92,826		668,333	89,431	
XC/TLH 1	233,000	21,201	21,231	267,000	22,262	22,359	162,000	21,678	21,811
XC/TLH 2	233,667	21,262		269,333	22,456		164,000	21,945	
XB 1	403,000	36,670	36,655	457,333	38,131	40,118	277,000	37,066	36,664
XB 2	402,667	36,639		505,000	42,105		271,000	36,263	
XB/BR 1	950,333	86,473	87,762	1150,000	95,883	96,300	661,667	88,539	90,033
XB/BR 2	978,667	89,051		1160,000	96,717		684,000	91,527	
XB/TLH 1	237,000	21,565	21,292	272,000	22,678	23,026	166,000	22,213	22,124
XB/TLH 2	231,000	21,019		280,333	23,373		164,667	22,034	
XEB 1	493,000	44,859	45,921	563,000	46,941	47,566	337,333	45,139	46,143
XEB 2	516,333	46,982		578,000	48,192		352,333	47,146	

Anexo B. Resultados obtidos nos ensaios realizados

Quadro B.20: Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

$\rho_{\text{calibrada}}$ do padrão (%)	96,30%
---	--------

Tipo Provete	75 ° / 0 °		
	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)
Padrao branco (medição inicial)	361,333		
XC 1	60,267	16,511	16,032
XC 2	56,767	15,552	
XC/BR 1	331,000	90,684	92,875
XC/BR 2	347,000	95,067	
XC/TLH 1	89,400	24,493	24,086
XC/TLH 2	86,433	23,680	
XB 1	140,333	38,447	38,173
XB 2	138,333	37,899	
XB/BR 1	330,667	90,592	93,195
XB/BR 2	349,667	95,798	
XB/TLH 1	90,967	24,922	24,840
XB/TLH 2	90,367	24,758	
XEB 1	182,000	49,862	50,684
XEB 2	188,000	51,506	

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

Quadro B.21: Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

$\rho_{\text{calibrada}}$ do padrão (%)	96,30%
---	--------

Tipo Proveite	0°/0°*			0°/15°			15°/0°		
	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)
Padrao branco (medição inicial)	1936,667			1563,333			1626,667		
XEB/BR 1	1366,667	68,606	69,694	1260,000	78,367	80,025	1233,333	74,000	75,300
XEB/BR 2	1410,000	70,782		1313,333	81,684		1276,667	76,600	
XEB/TLH 1	365,333	18,340	18,440	330,000	20,525	20,525	316,000	18,960	19,040
XEB/TLH 2	369,333	18,540		330,000	20,525		318,667	19,120	
ASF 1	534,667	26,840	27,610	292,333	18,182	17,436	338,333	20,300	21,270
ASF 2	565,333	28,380		268,333	16,689		370,667	22,240	
ASF/BR 1	1456,667	73,124	72,037	1343,333	83,550	82,410	1330,000	79,800	78,600
ASF/BR 2	1413,333	70,949		1306,667	81,269		1290,000	77,400	
ASF/TLH 1	435,667	21,870	22,155	368,667	22,930	23,396	381,333	22,880	23,010
ASF/TLH 2	447,000	22,439		383,667	23,862		385,667	23,140	
PVC 1	790,333	39,675	37,374	512,000	31,844	32,259	471,667	28,300	28,140
PVC 2	698,667	35,073		525,333	32,674		466,333	27,980	
Padrao branco (medição final)	1900,000			1533,333			1583,333		

Anexo B. Resultados obtidos nos ensaios realizados

Quadro B.22: Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

$\rho_{\text{calibrada}}$ do padrão (%)	96,30%
---	--------

Tipo Provete	0° / 30°			30° / 0°			0° / 45°		
	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)
Padrao branco (medição inicial)	1413,333			1333,333			1370,000		
XEB/BR 1	1256,667	85,323	87,134	1110,000	80,674	81,764	1240,000	87,056	88,226
XEB/BR 2	1310,000	88,945		1140,000	82,854		1273,333	89,396	
XEB/TLH 1	317,000	21,523	21,602	276,333	20,084	20,156	308,000	21,624	21,729
XEB/TLH 2	319,333	21,682		278,333	20,229		311,000	21,834	
ASF 1	93,467	6,346	6,062	98,633	7,169	8,030	34,233	2,403	2,498
ASF 2	85,100	5,778		122,333	8,891		36,933	2,593	
ASF/BR 1	1290,000	87,587	86,908	1170,000	85,035	83,581	1230,000	86,354	85,301
ASF/BR 2	1270,000	86,229		1130,000	82,128		1200,000	84,248	
ASF/TLH 1	327,000	22,202	22,508	315,667	22,942	22,712	300,000	21,062	21,202
ASF/TLH 2	336,000	22,813		309,333	22,482		304,000	21,343	
PVC 1	401,667	27,272	27,611	353,667	25,704	26,322	370,667	26,023	26,398
PVC 2	411,667	27,951		370,667	26,940		381,333	26,772	
Padrao branco (medição final)	1423,333			1316,667			1373,333		

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

Quadro B.23: Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

$\rho_{\text{calibrada}}$ do padrão (%)	96,30%
---	--------

Tipo Provete	45 ° / 0 °			0 ° / 60 °			60 ° / 0 °		
	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)
Padrao branco (medição inicial)	1056,667			1150,000			723,667		
XEB/BR 1	915,000	83,258	84,001	1110,000	92,548	94,216	625,000	83,632	84,881
XEB/BR 2	931,333	84,744		1150,000	95,883		643,667	86,130	
XEB/TLH 1	247,000	22,475	21,944	279,333	23,290	23,318	174,000	23,283	22,748
XEB/TLH 2	235,333	21,413		280,000	23,345		166,000	22,213	
ASF 1	34,467	3,136	3,244	21,233	1,770	2,096	13,500	1,806	1,851
ASF 2	36,833	3,352		29,033	2,421		14,167	1,896	
ASF/BR 1	952,000	86,625	85,214	1110,000	92,548	91,297	669,667	89,609	87,335
ASF/BR 2	921,000	83,804		1080,000	90,047		635,667	85,060	
ASF/TLH 1	244,333	22,232	22,050	266,000	22,178	22,817	166,333	22,257	22,124
ASF/TLH 2	240,333	21,868		281,333	23,457		164,333	21,990	
PVC 1	284,000	25,842	26,297	321,000	26,764	27,528	196,000	26,227	26,361
PVC 2	294,000	26,752		339,333	28,292		198,000	26,495	
Padrao branco (medição final)	1060,000			1160,000			715,667		

Anexo B. Resultados obtidos nos ensaios realizados

Quadro B.24: Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

$\rho_{\text{calibrada}}$ do padrão (%)	96,30%
---	--------

Tipo Provete	75 ° / 0 °		
	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)
Padrao branco (medição inicial)	361,333		
XEB/BR 1	326,333	89,405	89,405
XEB/BR 2	326,333	89,405	
XEB/TLH 1	90,333	24,749	23,886
XEB/TLH 2	84,033	23,023	
ASF 1	7,933	2,173	2,267
ASF 2	8,613	2,360	
ASF/BR 1	346,000	94,793	90,775
ASF/BR 2	316,667	86,757	
ASF/TLH 1	87,333	23,927	23,306
ASF/TLH 2	82,800	22,685	
PVC 1	86,267	23,634	23,707
PVC 2	86,800	23,780	
Padrao branco (medição final)	341,667		

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

Quadro B.25: Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

$\rho_{\text{calibrada}}$ do padrão (%)	96,30%
---	--------

Tipo Provete	0°/0°*			0°/15°			15°/0°		
	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)
Padrao branco (medição inicial)	1490,000			1350,000			1366,667		
XC/BR_P	1180,000		76,435	1283,333		92,921	1136,667		78,938
XC/TLH_P	321,000		20,793	367,333		26,597	305,000		21,181
ASF/BR_P	1223,333		79,242	1186,667		85,922	1143,333		79,401
ASF/TLH_P	409,667		26,536	367,000		26,573	371,667		25,811
Padrao branco (medição final)	1483,333			1310,000			1406,667		

Quadro B.26: Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

$\rho_{\text{calibrada}}$ do padrão (%)	96,30%
---	--------

Tipo Provete	0 ° / 30 °			30 ° / 0 °			0 ° / 45 °		
	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)
Padrao branco (medição inicial)	1190,000			1036,667			1166,667		
XC /BR_P	1086,667		88,683	967,333		88,159	1106,667		91,741
XC/TLH_P	270,333		22,062	245,000		22,328	265,667		22,023
ASF/BR_P	1090,000		88,955	973,000		88,675	1100,000		91,188
ASF/TLH_P	308,333		25,163	280,000		25,518	276,333		22,908
Padrao branco (medição final)	1170,000			1076,667			1156,667		

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

Quadro B.27: Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

$\rho_{\text{calibrada}}$ do padrão (%)	96,30%
---	--------

Tipo Provete	45° / 0°			0° / 60°			60° / 0°		
	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	ρ_{med} (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	ρ_{med} (%)	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	ρ_{med} (%)
Padrao branco (medição inicial)	860,667			875,667			461,667		
XC/BR_P	846,000		94,294	813,333		89,309	455,333		95,600
XC/TLH_P	202,000		22,515	190,000		20,863	106,000		22,255
ASF/BR_P	838,000		93,402	802,000		88,065	436,333		91,611
ASF/TLH_P	208,000		23,183	190,667		20,936	107,333		22,535
Padrao branco (medição final)	867,333			878,333			455,667		

Anexo B. Resultados obtidos nos ensaios realizados

Quadro B.28: Análise dos resultados obtidos no ensaio da variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura.

$\rho_{\text{calibrada}}$ do padrão (%)	96,30%
---	--------

Tipo Provete	75 ° / 0 °		
	$L_{\text{média}}$ (cd/m ²)	ρ (%)	$\rho_{\text{méd}}$ (%)
Padrao branco (medição inicial)	288,000		
XC /BR_P	298,667		99,636
XC/TLH_P	70,567		23,541
ASF/BR_P	275,000		91,741
ASF/TLH_P	68,967		23,007
Padrao branco (medição final)	289,333		

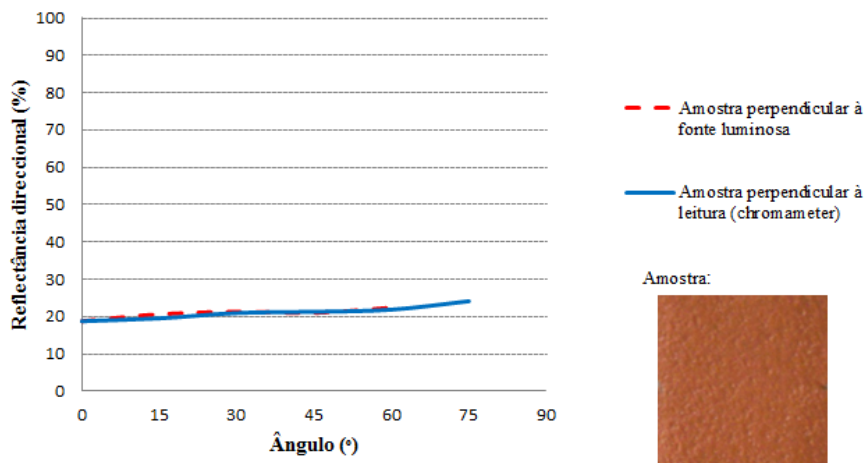


Fig. B.1: Reflectância direccional obtida para a amostra XC/TLH tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

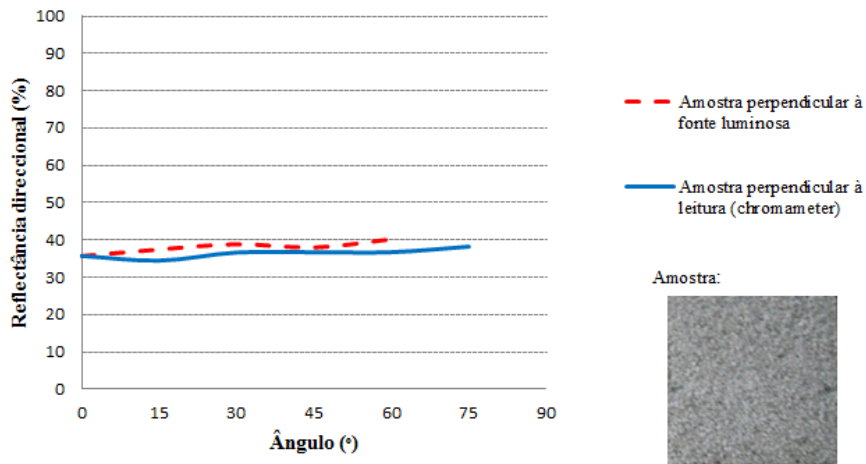


Fig. B.2: Reflectância direccional obtida para a amostra XB tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.

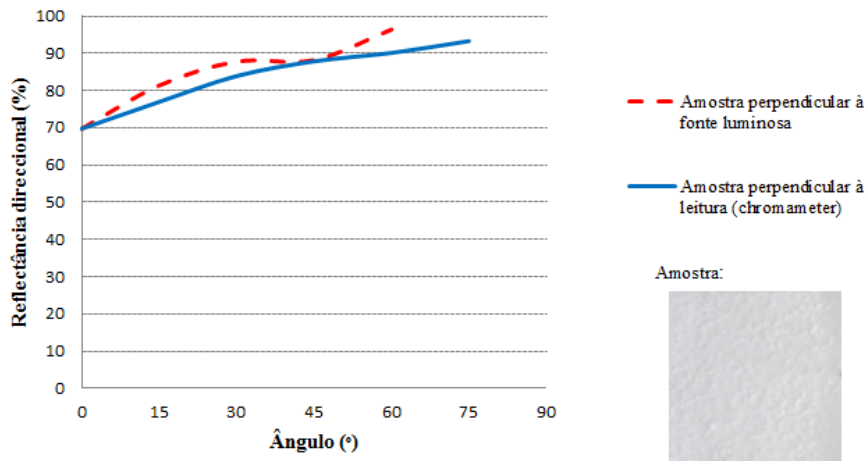


Fig. B.3: Reflectância direccional obtida para a amostra XB/BR tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.

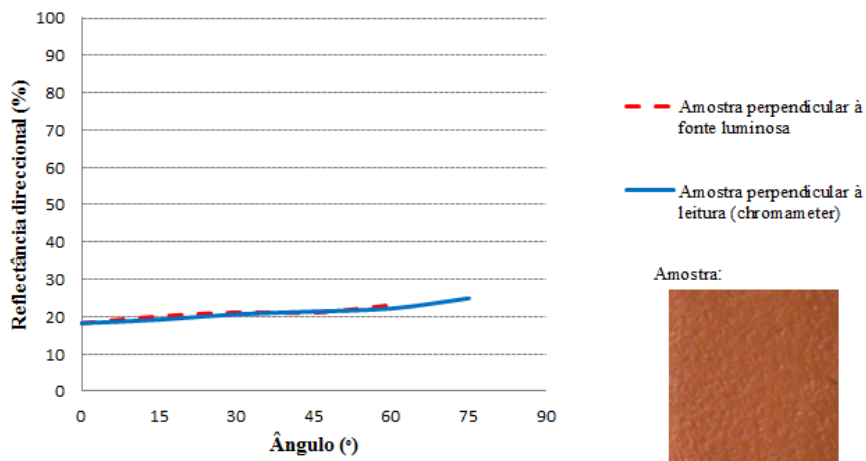


Fig. B.4: Reflectância direccional obtida para a amostra XB/TLH tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.

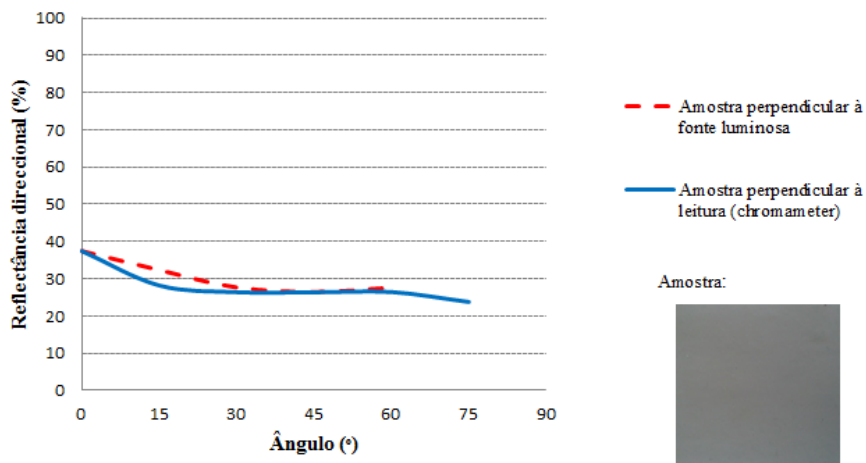


Fig. B.5: Reflectância direccional obtida para a amostra PVC tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

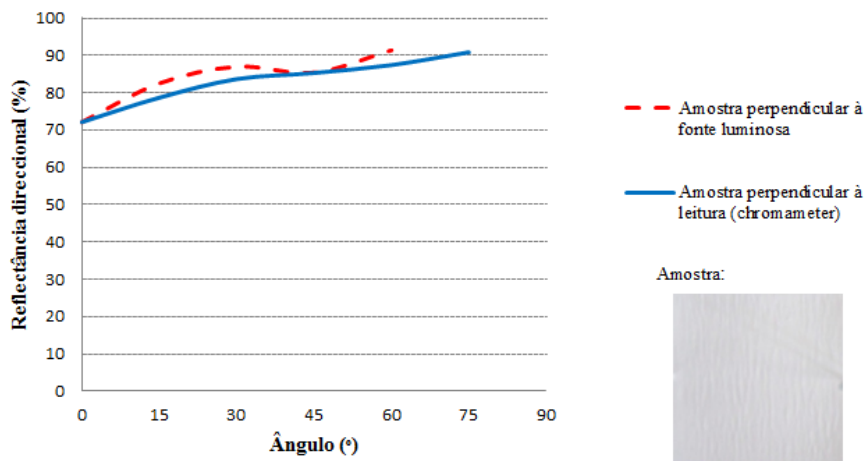


Fig. B.6: Reflectância direccional obtida para a amostra ASF/BR tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.

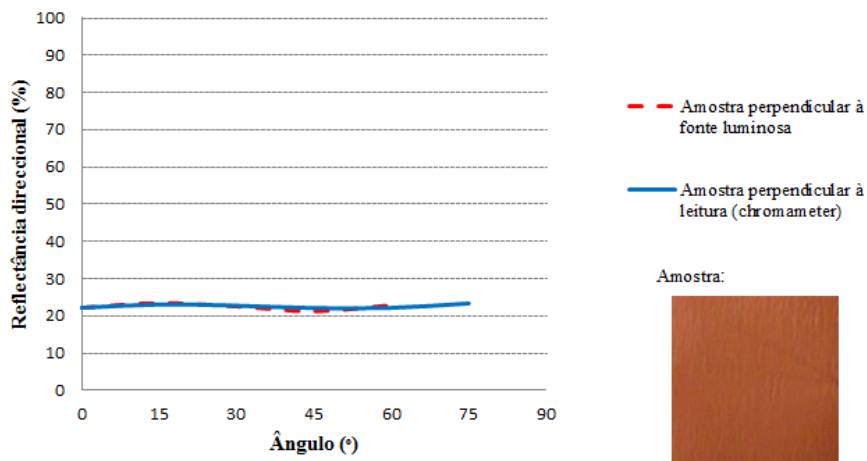


Fig. B.7: Reflectância direccional obtida para a amostra ASF/TLH tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.

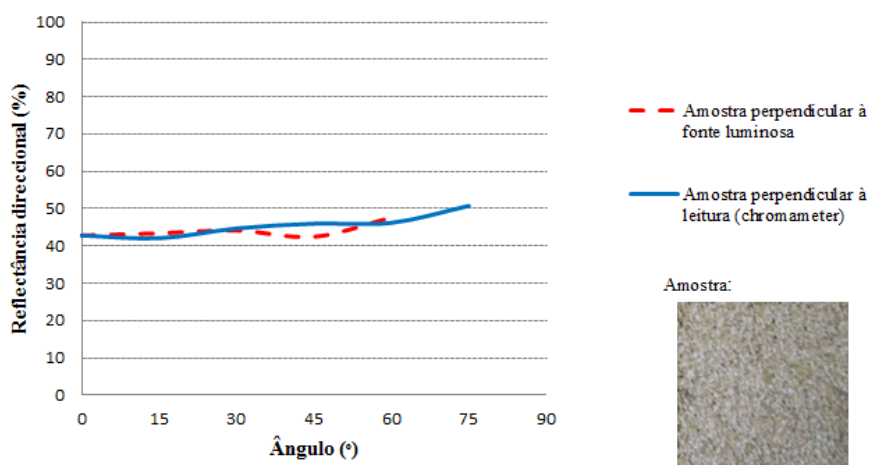


Fig. B.8: Reflectância direccional obtida para a amostra XEB tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.

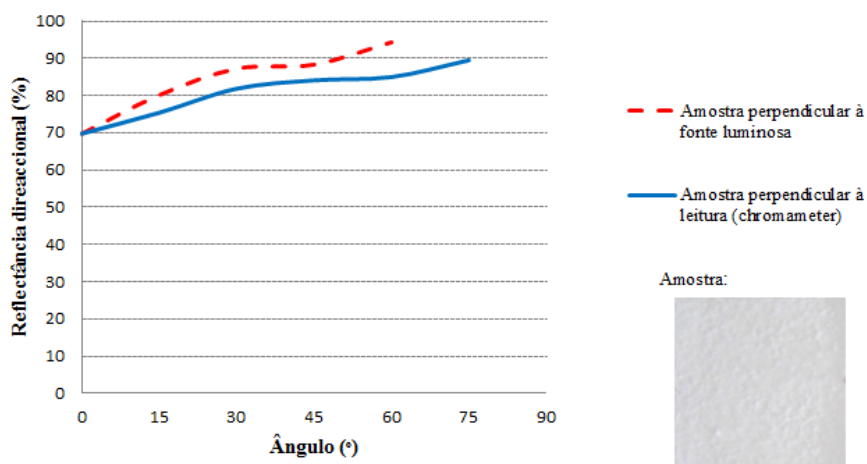


Fig. B.9: Reflectância direccional obtida para a amostra XEB/BR tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

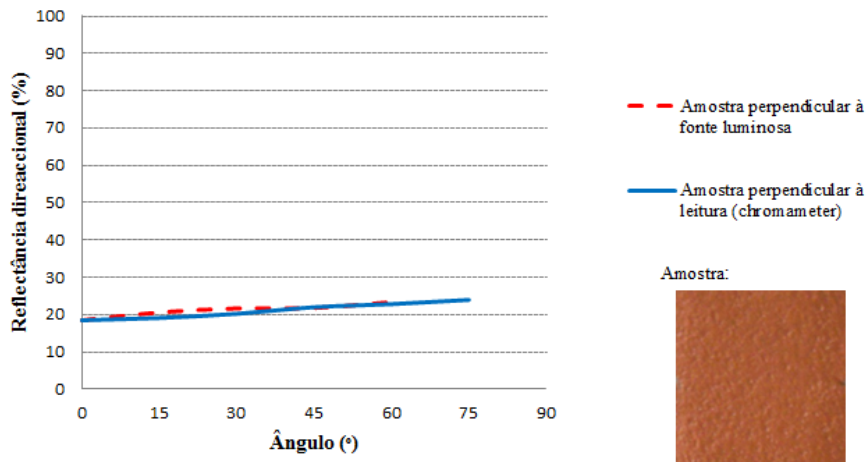


Fig. B.10: Reflectância direccional obtida para a amostra XEB/TLH tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.

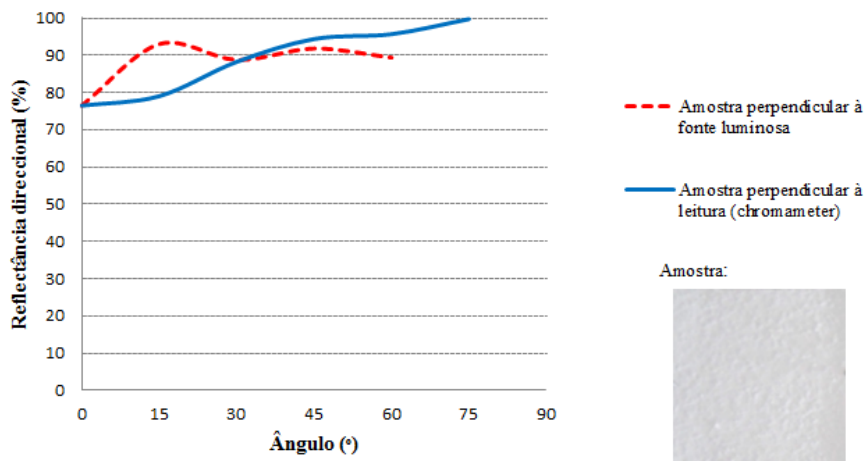


Fig. B.11: Reflectância direccional obtida para a amostra XC/BR_P tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.

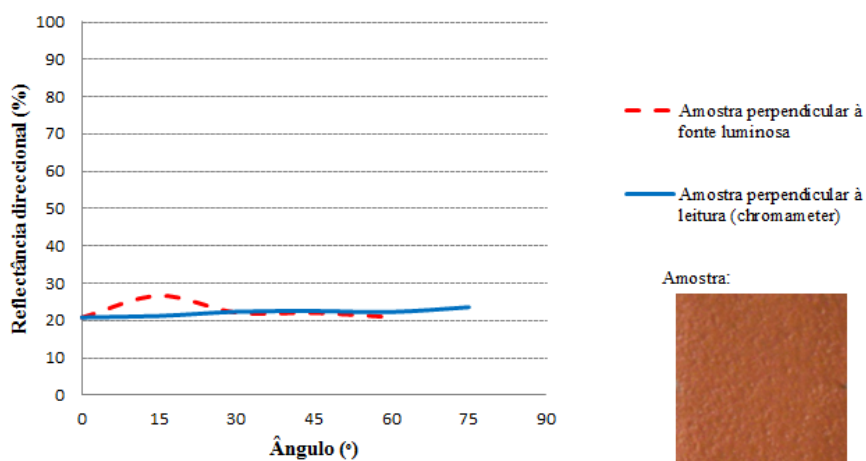


Fig. B.12: Reflectância direccional obtida para a amostra XC/TLH_P tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.

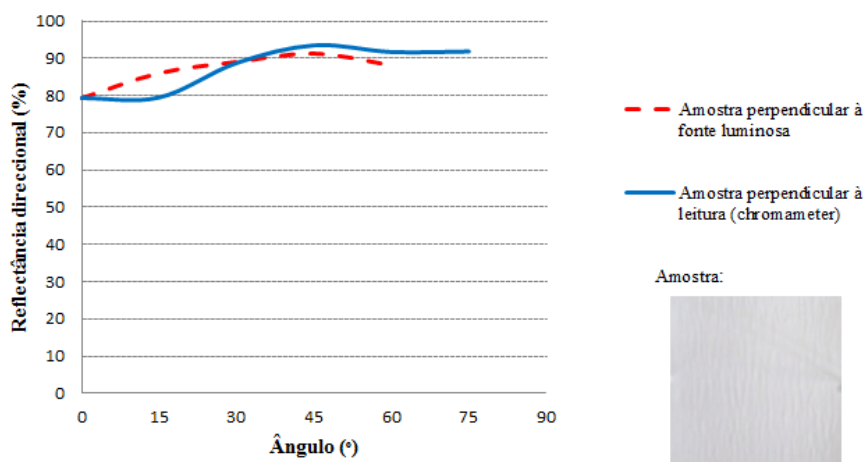


Fig. B.13: Reflectância direccional obtida para a amostra ASF/BR_P tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.

B.1. Variação da reflectância com o ângulo de incidência da fonte luminosa/leitura (visível)

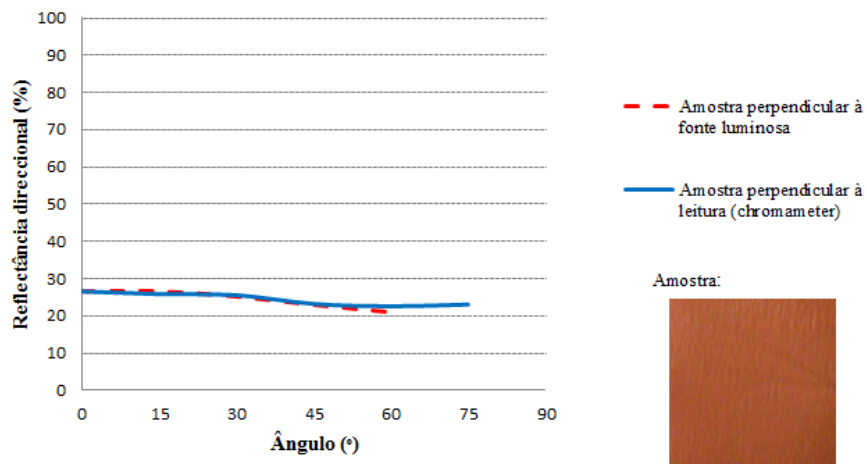


Fig. B.14: Reflectância direccional obtida para a amostra ASF/TLH_P tanto com a amostra perpendicular à fonte luminosa como com a amostra perpendicular à leitura.

B.2 Reflectância total - Esfera integradora LMT RT 500 (visível)

Quadro B.29: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora.

Tipo Provete	nº Provete	EF	Esfera integradora
			ρ_{total}
Padrao			88,70
XC	1	0,1	14,40
			14,00
			13,90
	2		14,50
			13,90
			14,50
XC/BR	1	0,1	85,50
			85,10
			85,80
	2		86,10
			86,50
			85,70
XC/TLH	1	0,1	21,00
			21,10
			21,00
	2		20,80
			21,00
			20,80
XB	1	0,1	36,70
			36,80
			37,10
	2		36,90
			36,30
			36,80
XB/BR	1	0,1	87,50
			88,40
			88,30
	2		85,90
			87,30
			87,20

B.2. Reflectância total - Esfera integradora LMT RT 500 (visível)

Quadro B.30: Folha de registro com os dados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora.

Tipo Provete	nº Provete	EF	Esfera integradora
			p _{total}
Padrao		0,1	88,70
XB/TLH	1	0,1	20,80
			21,00
			20,60
	2		20,80
			20,90
			20,80
XEB	1	0,1	45,30
			44,50
			44,30
	2		45,00
			45,20
			45,90
XEB/BR	1	0,1	86,40
			86,00
			86,20
	2		88,30
			88,00
			88,20
XEB/TLH	1	0,1	21,10
			21,10
			21,00
	2		21,10
			21,00
			21,00
ASF	1	0,1	5,50
			5,30
			5,70
	2		5,40
			5,70
			5,50

Anexo B. Resultados obtidos nos ensaios realizados

Quadro B.31: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora.

Tipo Provete	nº Provete	EF	Esfera integradora	
				ρtotal
Padrao			0,1	88,70
ASF/BR	1	0,1		86,50
				86,20
				86,50
	2			83,50
				83,10
				84,30
ASF/TLH	1	0,1		21,40
				21,40
				21,30
	2			21,30
				21,30
				21,30
PVC	1	0,1		27,70
				27,70
				27,80
	2			28,30
				28,10
				28,10

Quadro B.32: Folha de registo com os dados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora.

Tipo Provete	nº Provete	EF	Esfera integradora	
				ρtotal
Padrao			0,1	88,70
XC/BR_P	1			88,70
				88,10
				88,40
XC/TLH_P	1			21,30
				21,20
				21,10
ASF/BR_P	1			88,70
				87,40
				88,60
ASF/TLH_P	1			21,60
				21,60
				21,40

Quadro B.33: Análise dos resultados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora.

ρ_N do padrão (%)	88,70%
------------------------	--------

Tipo Provete	ρ_{total} (%)	ρ_{total} média (%)
XC 1	14,10	14,20
XC 2	14,30	
XC/BR 1	85,47	85,78
XC/BR 2	86,10	
XC/TLH 1	21,03	20,95
XC/TLH 2	20,87	
XB 1	36,87	36,77
XB 2	36,67	

Quadro B.34: Análise dos resultados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora.

ρ_N do padrão (%)	88,70%	
Tipo Provete	ρ total (%)	ρ total média (%)
XB/BR 1	88,07	87,43
XB/BR 2	86,80	
XB/TLH 1	20,80	20,82
XB/TLH 2	20,83	
XEB 1	44,70	45,03
XEB 2	45,37	

Quadro B.35: Análise dos resultados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora.

ρ_N do padrão (%)	88,70%	
Tipo Provete	ρ total (%)	ρ total média (%)
XEB/BR 1	86,20	87,18
XEB/BR 2	88,17	
XEB/TLH 1	21,07	21,05
XEB/TLH 2	21,03	
ASF 1	5,50	5,52
ASF 2	5,53	

Quadro B.36: Análise dos resultados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora.

ρ_N do padrão (%)	88,70%	
Tipo Provete	ρ_{total} (%)	$\rho_{total\ média}$ (%)
ASF/BR 1	86,40	85,02
ASF/BR 2	83,63	
ASF/TLH 1	21,37	21,33
ASF/TLH 2	21,30	

Quadro B.37: Análise dos resultados obtidos no ensaio da reflectância total - esfera integradora.

ρ_N do padrão (%)	88,70%	
Tipo Provete	ρ_{total} (%)	$\rho_{total\ média}$ (%)
PVC 1	27,73	27,95
PVC 2	28,17	
XC/BR_P		88,40
XC/TLH_P		21,20
ASF/BR_P		88,23
ASF/TLH_P		21,53

B.3 Reflectância total - Espectrofotômetro HITACHI modelo U-3300 (UV/ visível/ NIR)

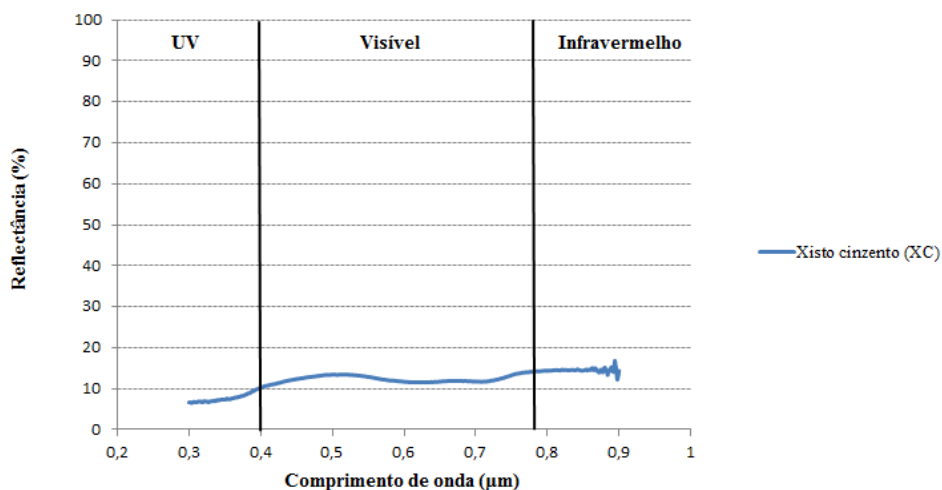


Fig. B.15: Variação da reflectância total da amostra XC com o comprimento de onda.

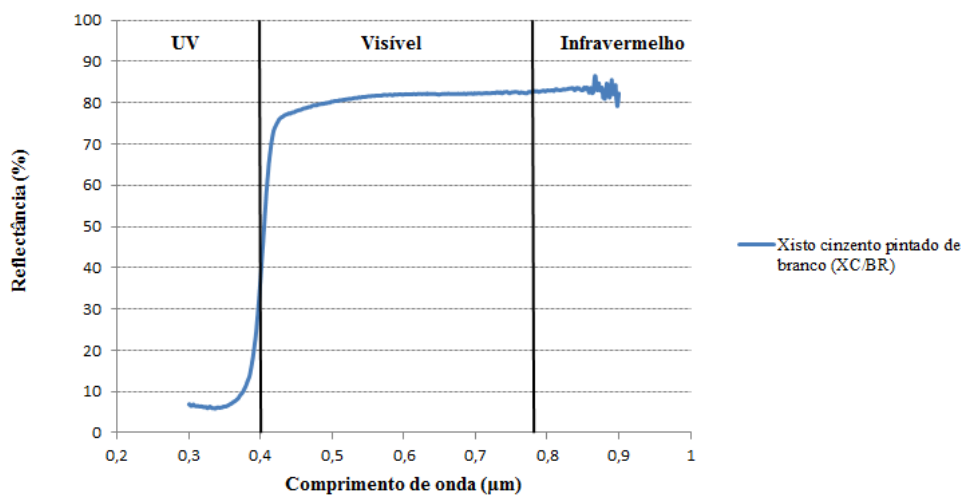


Fig. B.16: Variação da reflectância total da amostra XC/BR com o comprimento de onda.

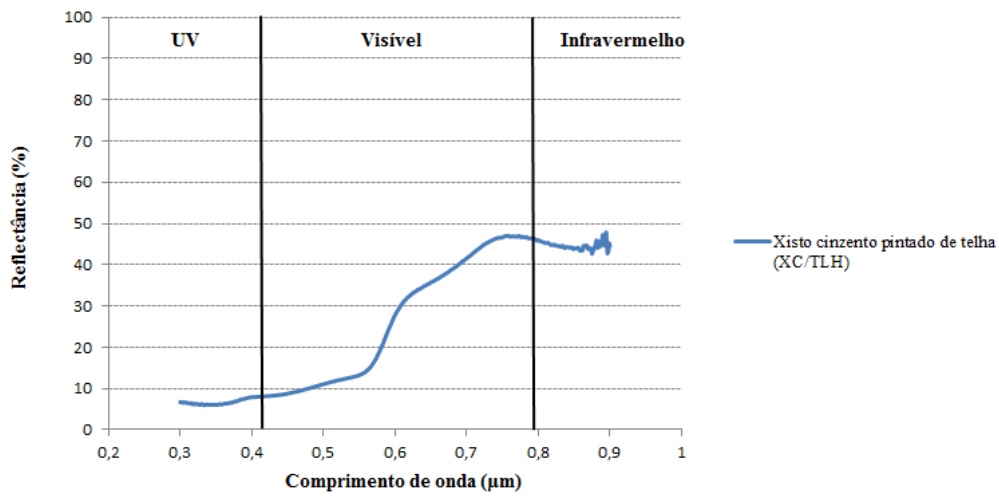


Fig. B.17: Variação da reflectância total da amostra XC/TLH com o comprimento de onda.

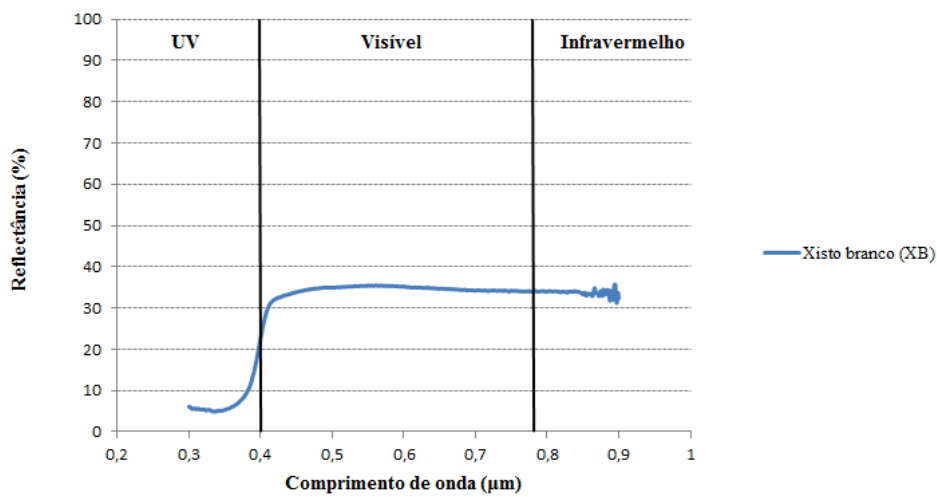


Fig. B.18: Variação da reflectância total da amostra XB com o comprimento de onda.

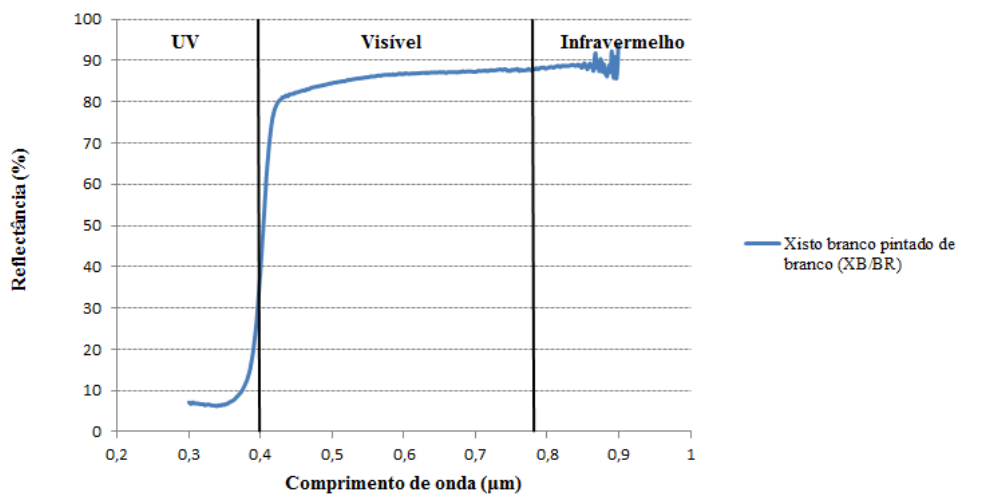


Fig. B.19: Variação da reflectância total da amostra XB/BR com o comprimento de onda.

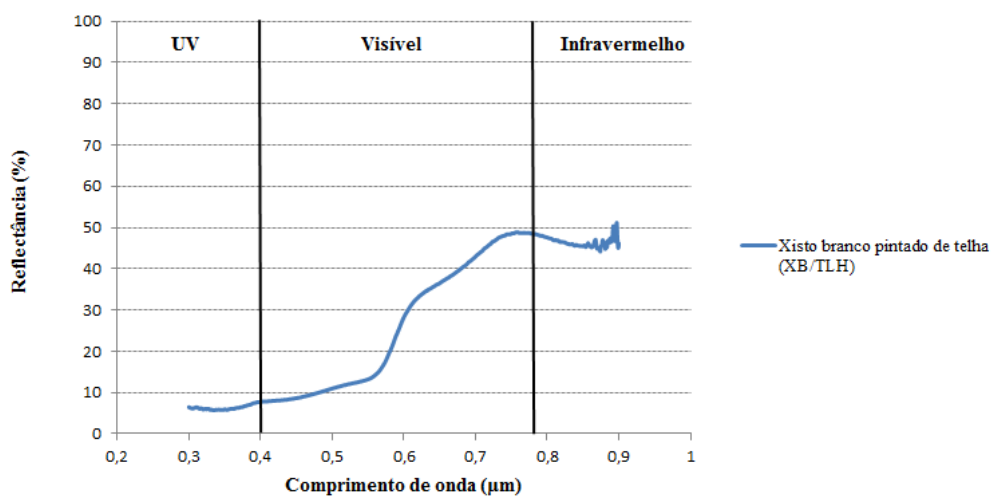


Fig. B.20: Variação da reflectância total da amostra XB/TLH com o comprimento de onda.

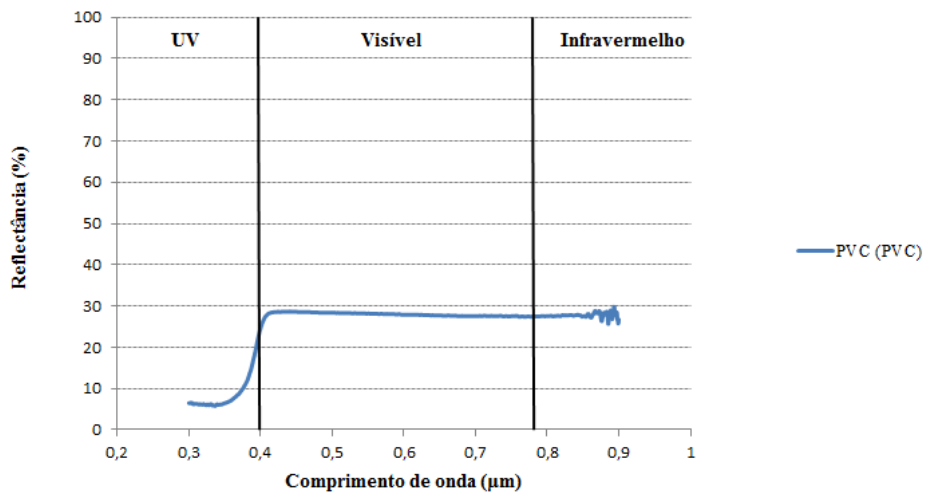


Fig. B.21: Variação da reflectância total da amostra PVC com o comprimento de onda.

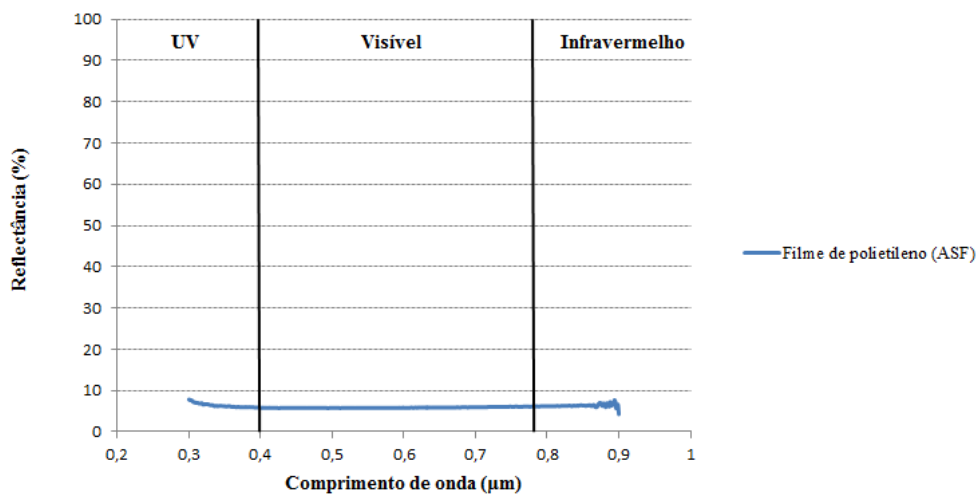


Fig. B.22: Variação da reflectância total da amostra ASF com o comprimento de onda.

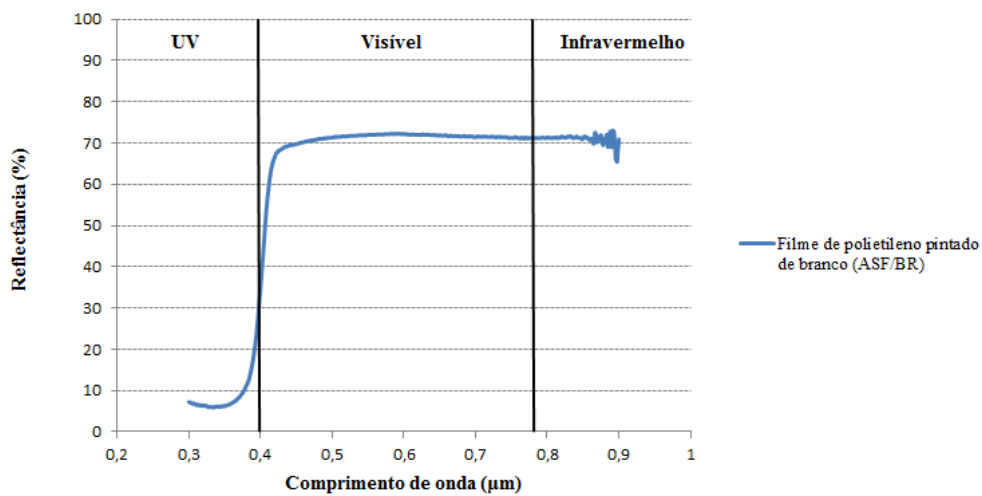


Fig. B.23: Variação da reflectância total da amostra ASF/BR com o comprimento de onda.

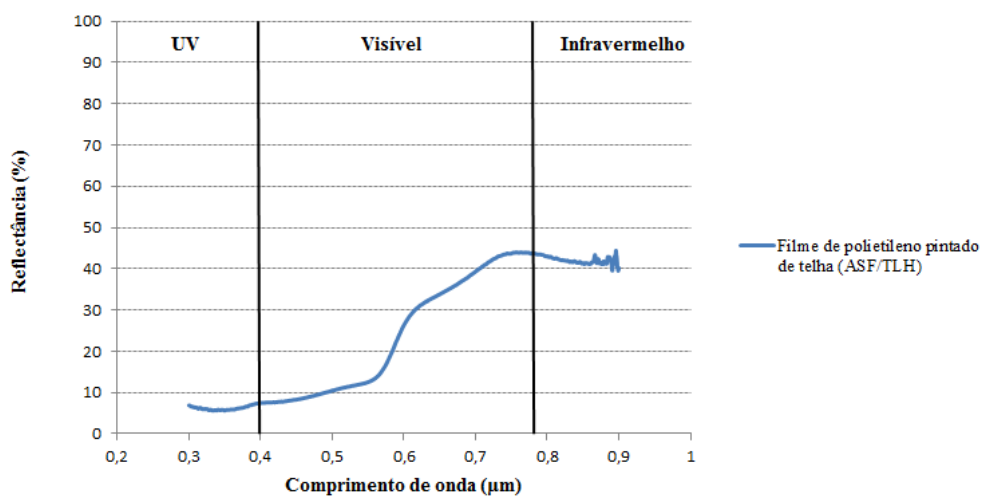


Fig. B.24: Variação da reflectância total da amostra ASF/TLH com o comprimento de onda.

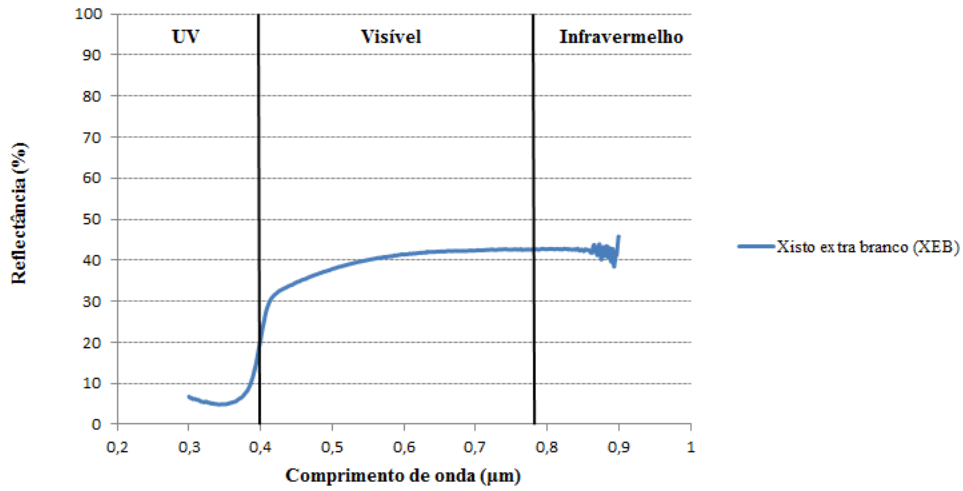


Fig. B.25: Variação da reflectância total da amostra XEB com o comprimento de onda.

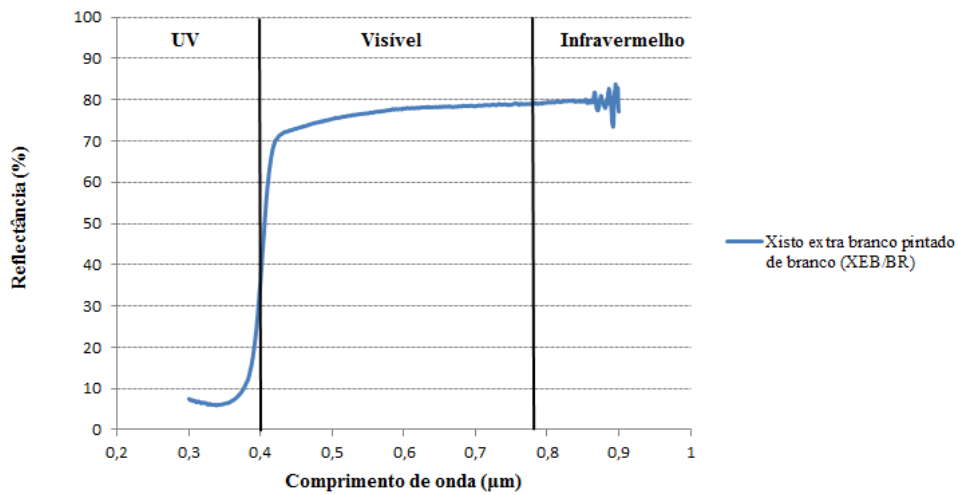


Fig. B.26: Variação da reflectância total da amostra XEB/BR com o comprimento de onda.

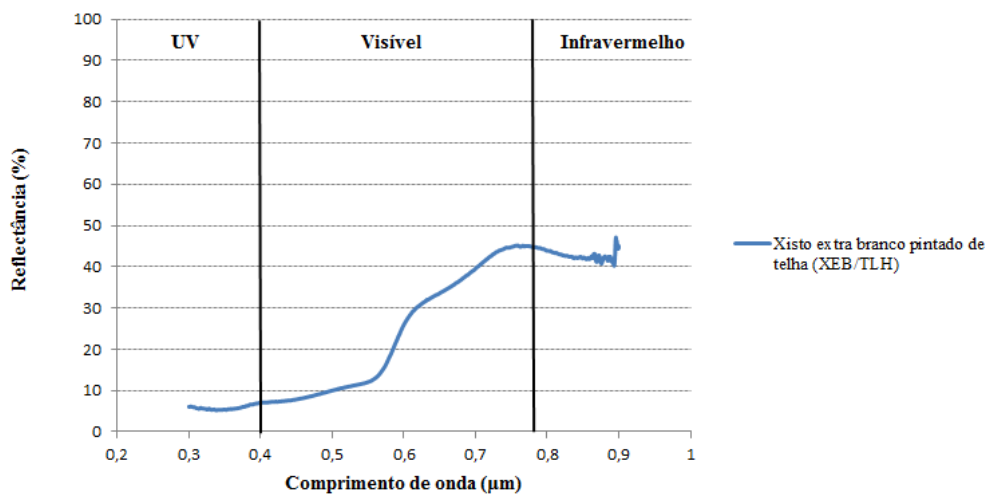


Fig. B.27: Variação da reflectância total da amostra XEB/TLH com o comprimento de onda.

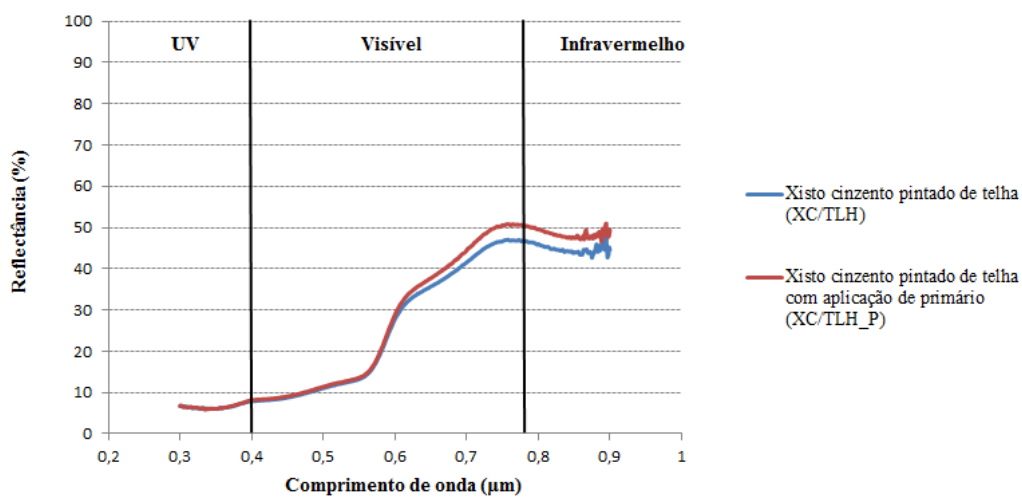


Fig. B.28: Influência da aplicação de primário na reflectância total da amostra XC/TLH - ensaio espectrofotômetro.

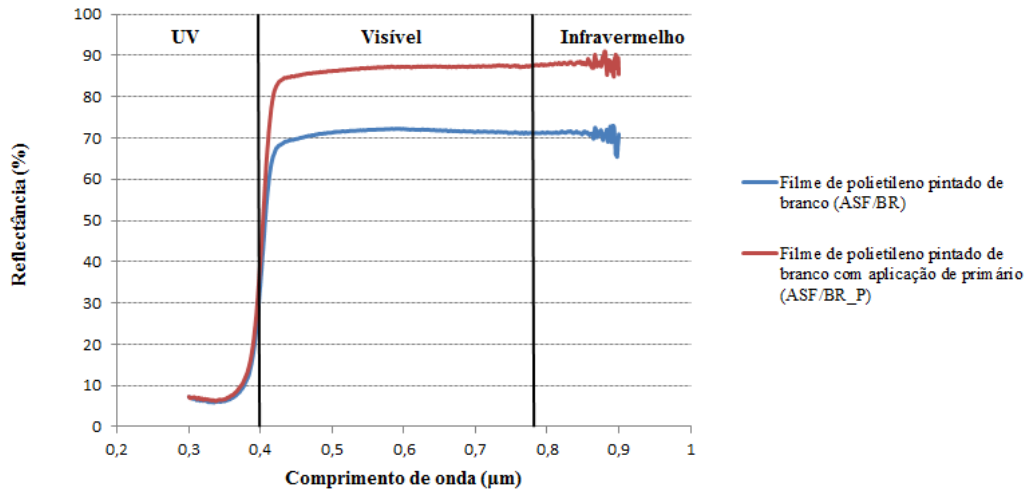


Fig. B.29: Influência da aplicação de primário na reflectância total da amostra ASF/BR - ensaio espectrofotômetro.

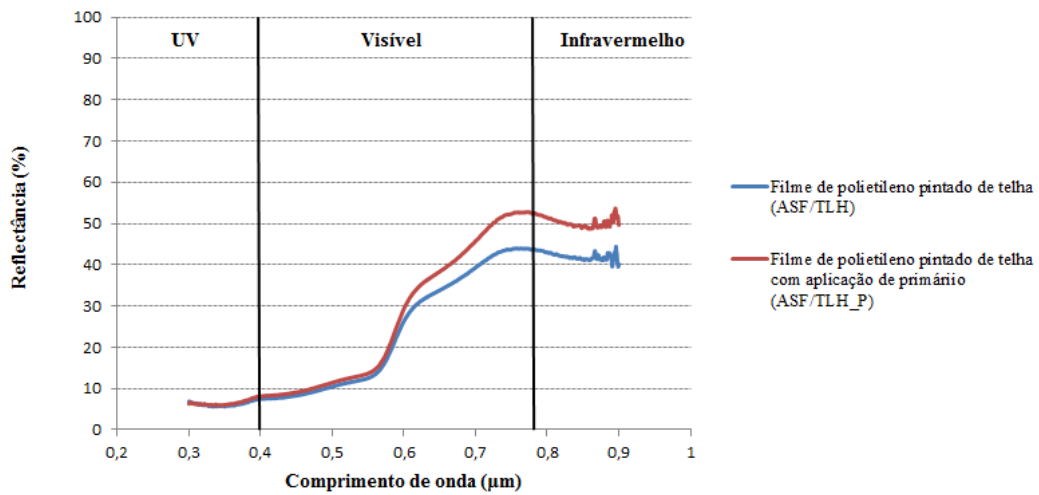


Fig. B.30: Influência da aplicação de primário na reflectância total da amostra ASF/TLH - ensaio espectrofotômetro.

B.4 Detecção de anomalias por termografia de infravermelhos - ensaios em laboratório

B.4.1 Detecção de empolamentos

Aquecimento por condução

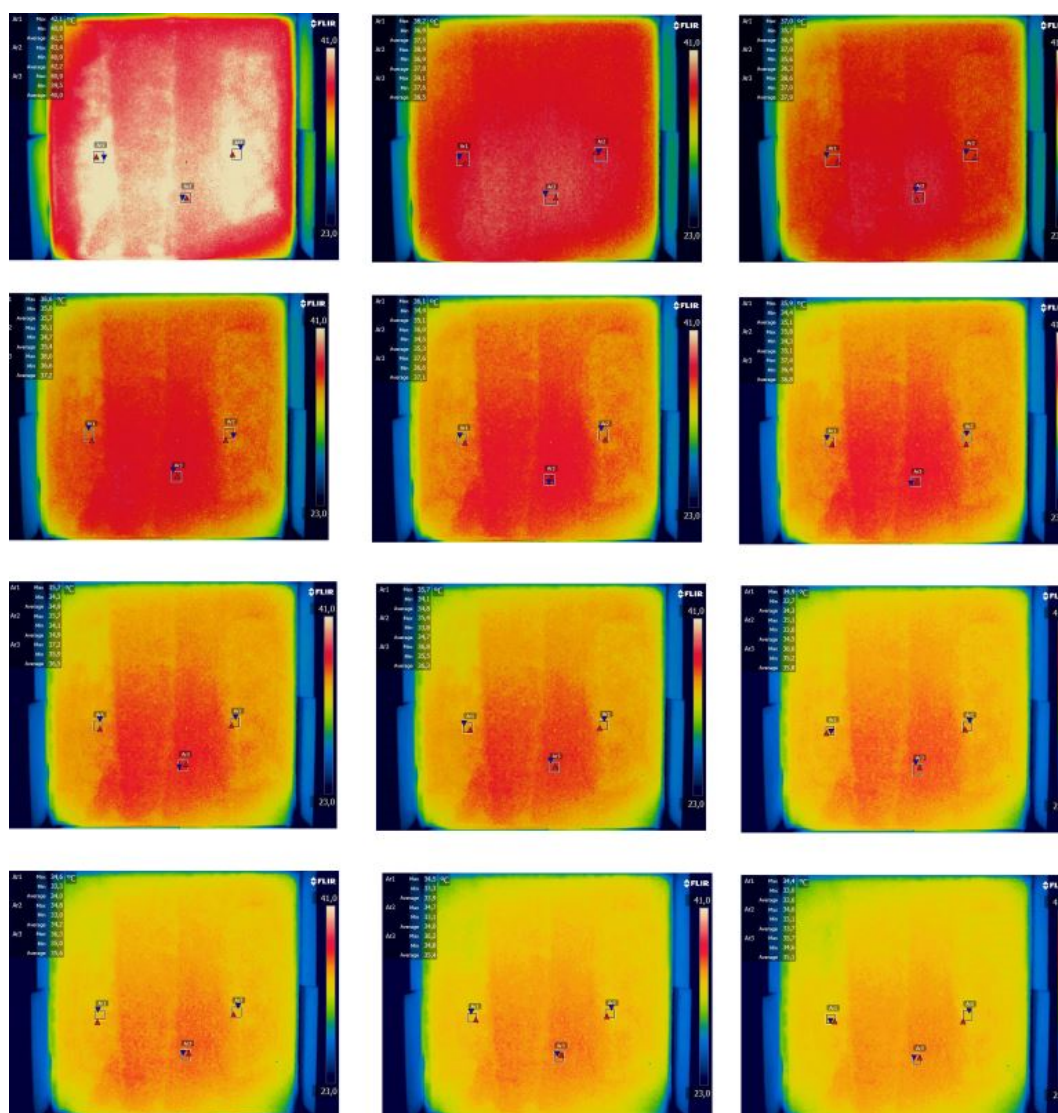


Fig. B.31: Termogramas para a detecção de empolamentos obtidos com a câmara termográfica perpendicular ao provete - período 60 minutos, aquecimento por condução.

B.4. Detecção de anomalias por termografia de infravermelhos - ensaios em laboratório

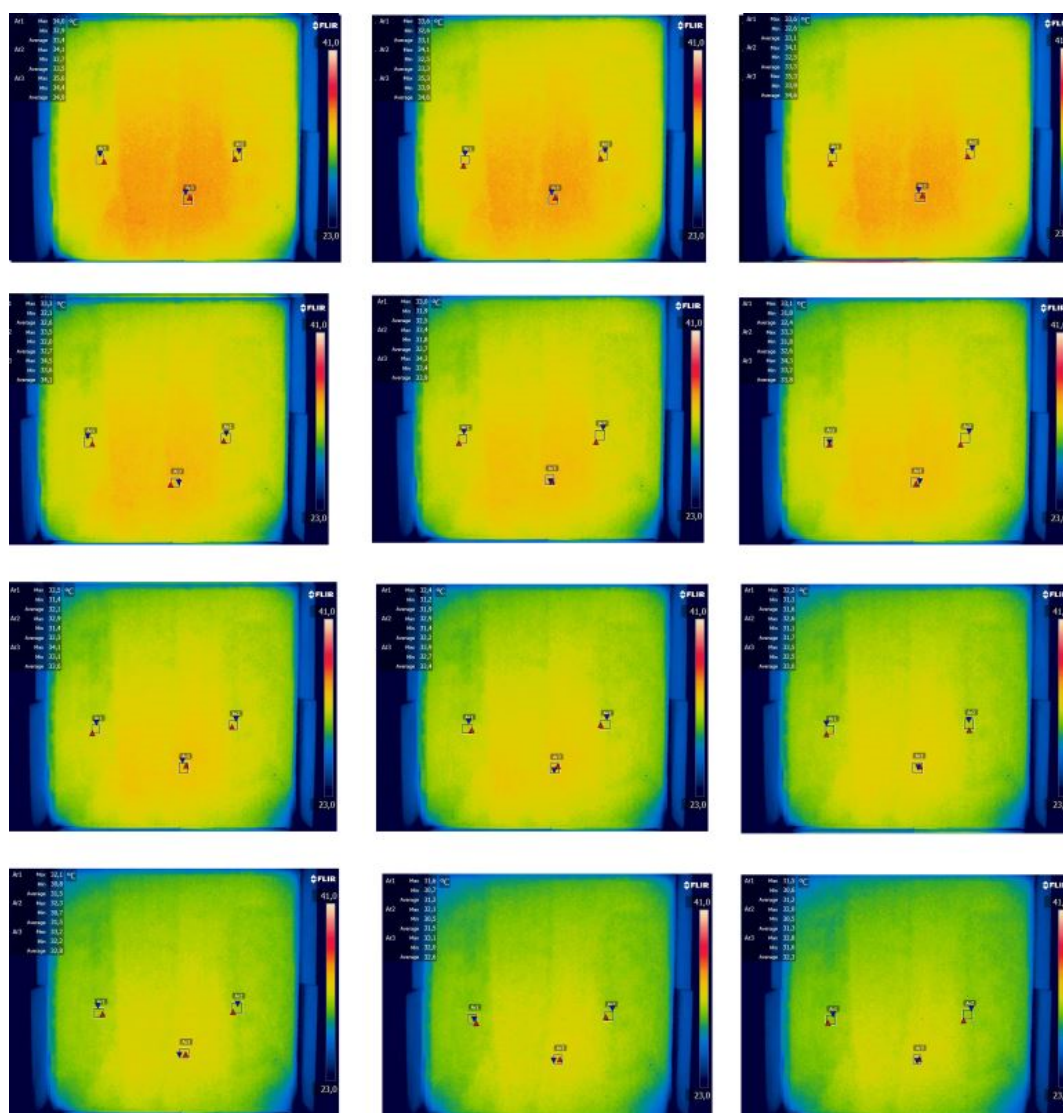


Fig. B.32: Termogramas para a detecção de empolamentos obtidos com a câmara termográfica perpendicular ao provete - período 60 minutos, aquecimento por condução.

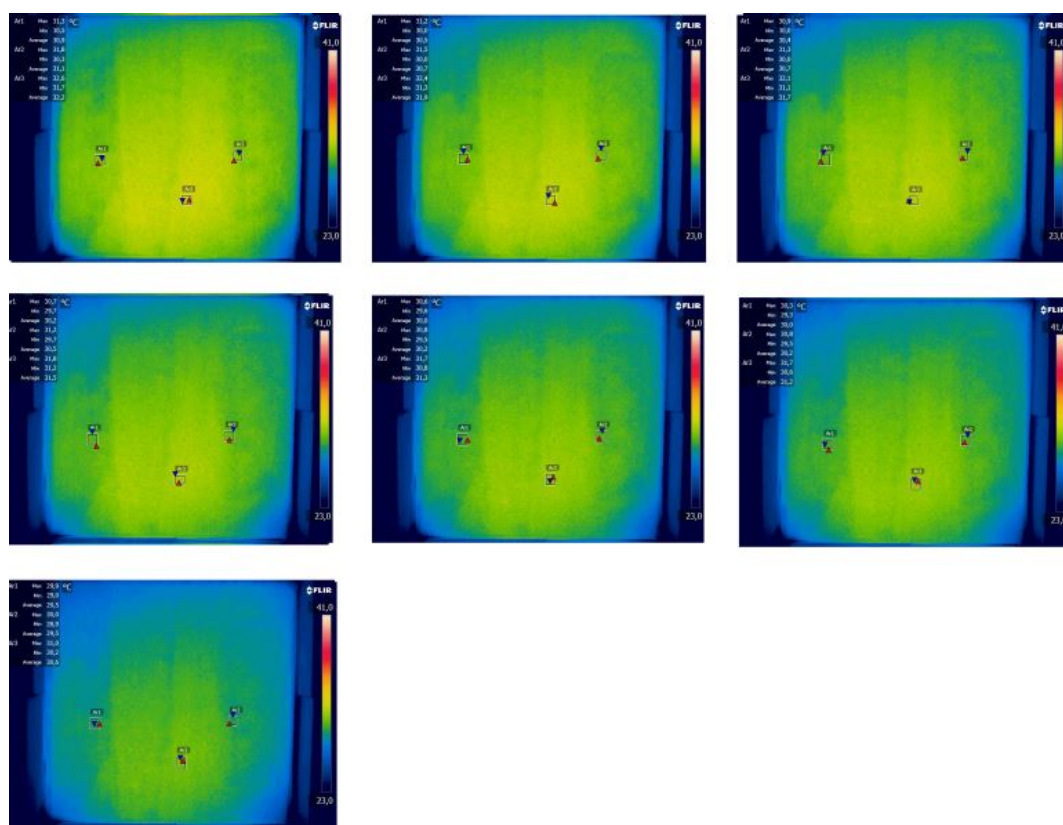


Fig. B.33: Termogramas para a detecção de empolamentos obtidos com a câmara termográfica perpendicular ao prorete - período 60 minutos, aquecimento por condução.

Aquecimento por radiação

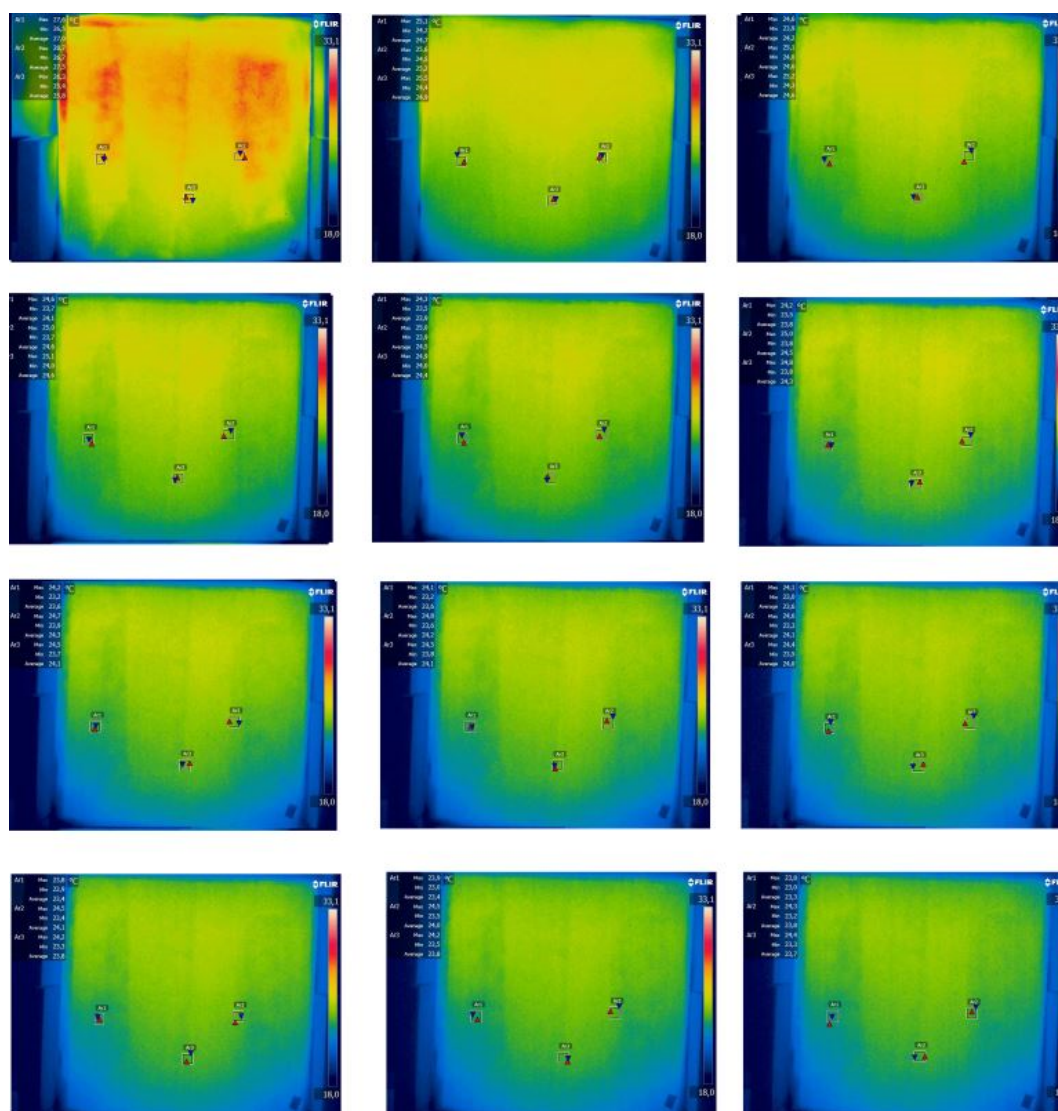


Fig. B.34: Termogramas para a detecção de empolamentos obtidos com a câmara termográfica perpendicular ao provete - período 60 minutos, aquecimento por radiação.

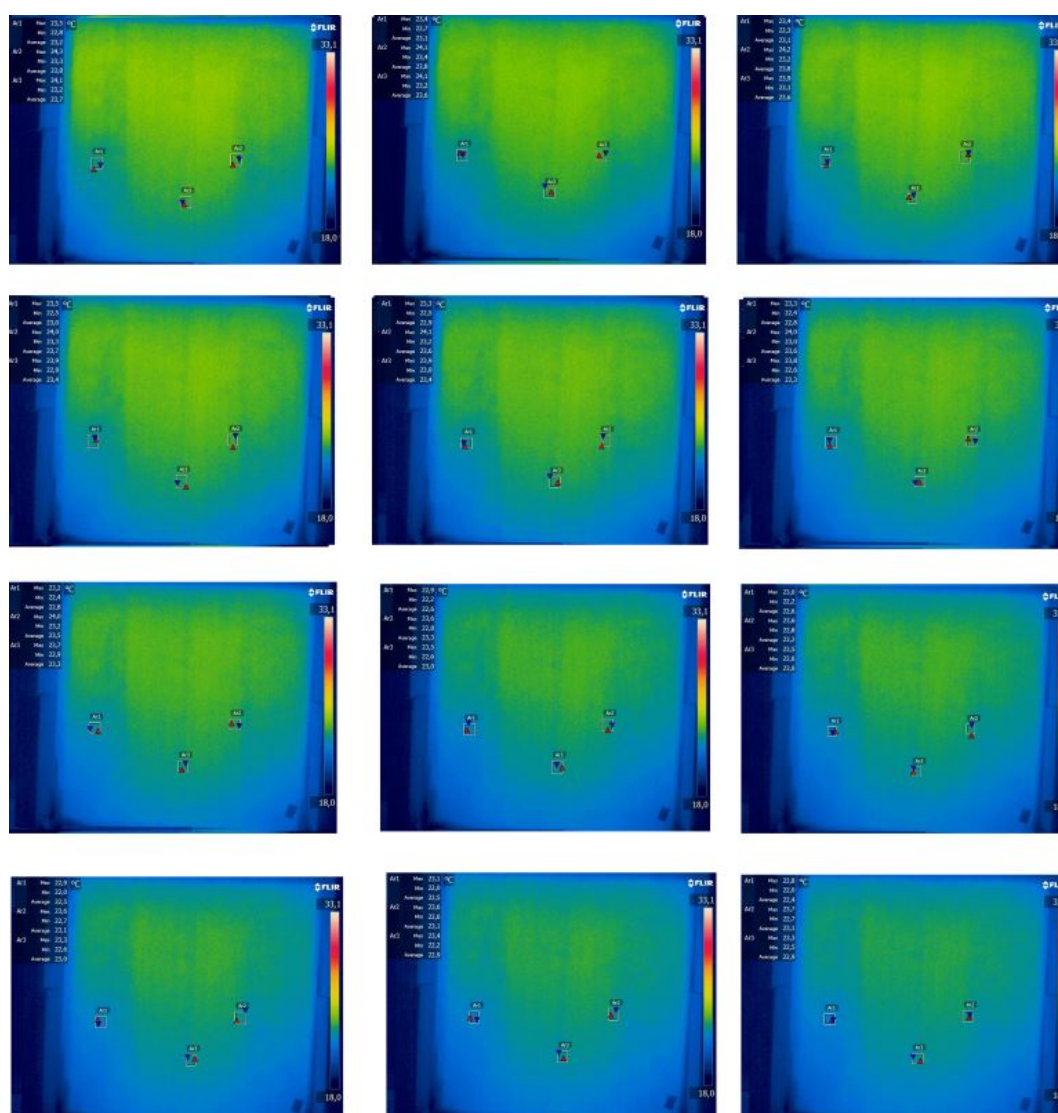


Fig. B.35: Termogramas para a detecção de empolamentos obtidos com a câmara termográfica perpendicular ao proвете - período 60 minutos, aquecimento por radiação.

B.4.2 Detecção de água

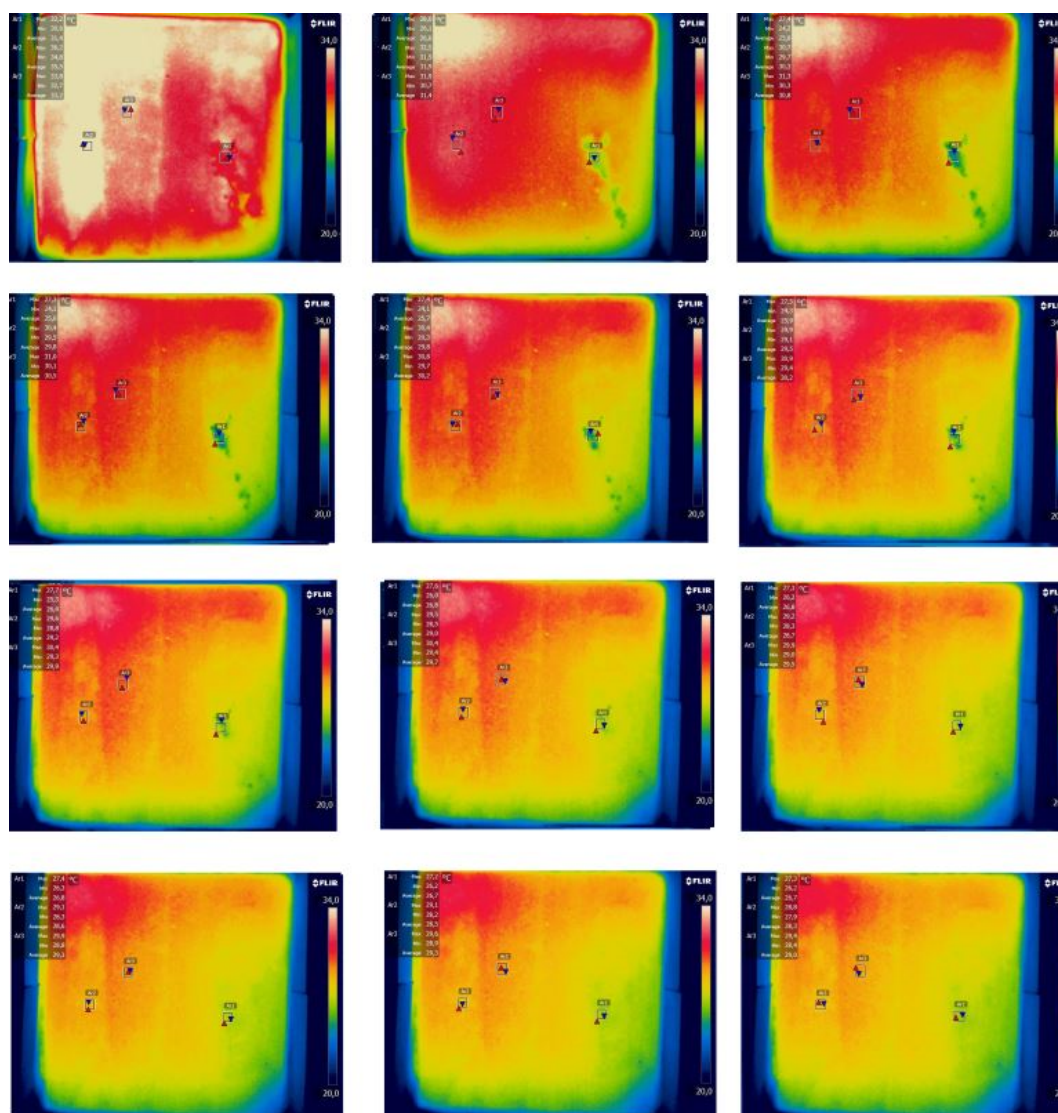


Fig. B.36: Termogramas para a detecção de água obtidos com a câmara termográfica perpendicular ao provete -período 60 minutos, aquecimento por condução.

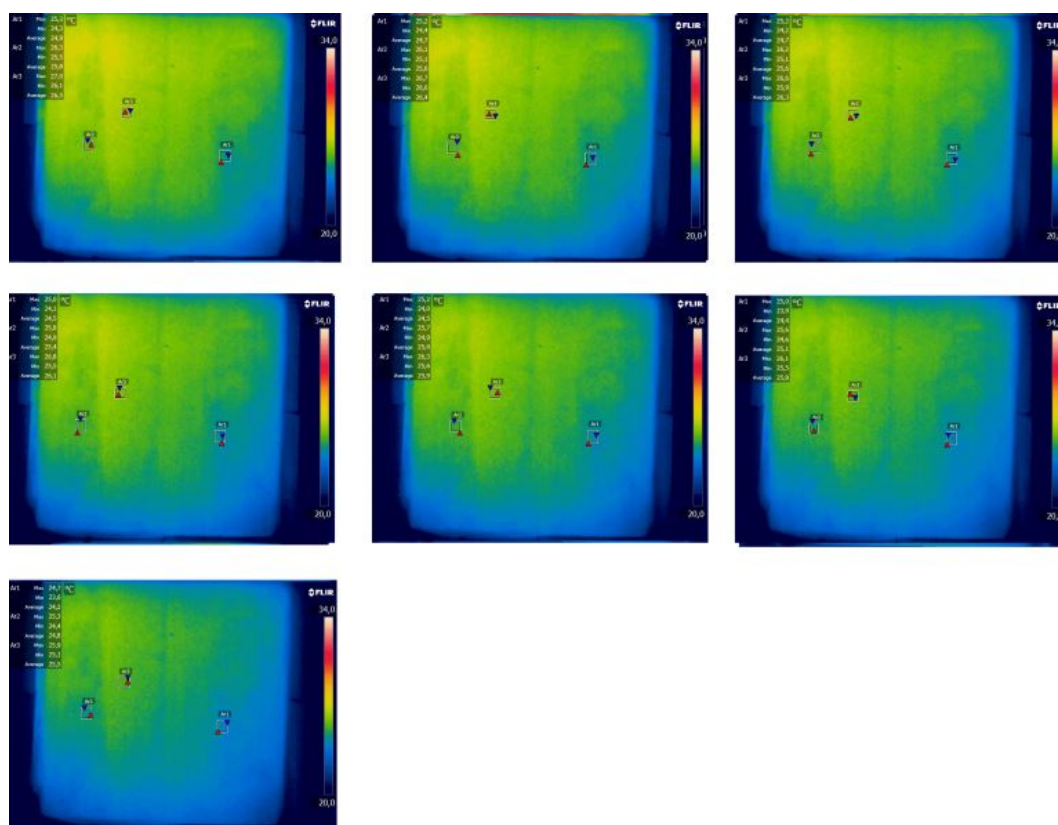


Fig. B.38: Termogramas para a detecção de água obtidos com a câmara termográfica perpendicular ao provete -período 60 minutos, aquecimento por condução.

B.4.3 Alteração do ângulo de observação

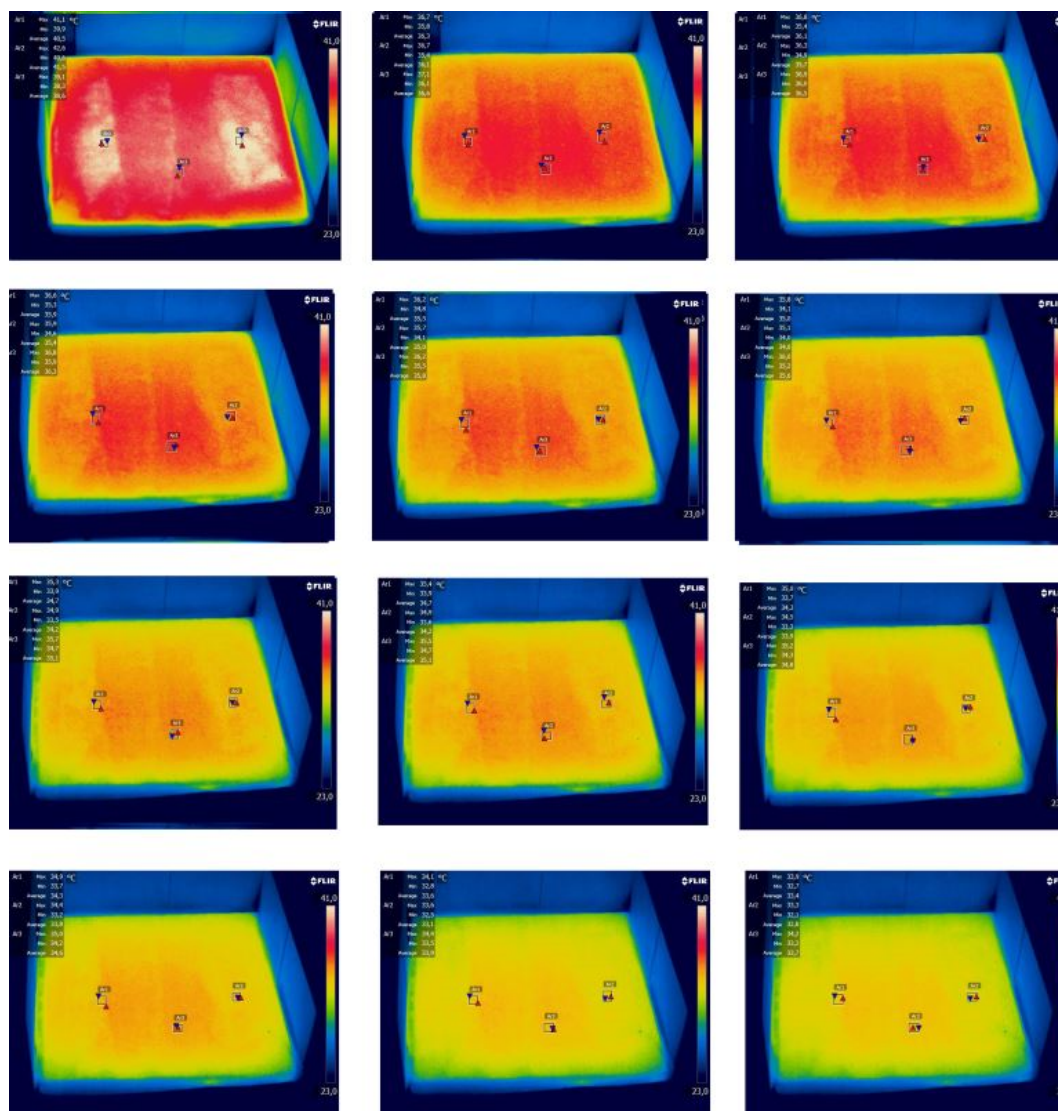


Fig. B.39: Termogramas para a detecção de empolamentos obtidos com a câmara termográfica a 60° com a normal à superfície do provete - período 60 minutos, aquecimento por condução.

B.4. Detecção de anomalias por termografia de infravermelhos - ensaios em laboratório

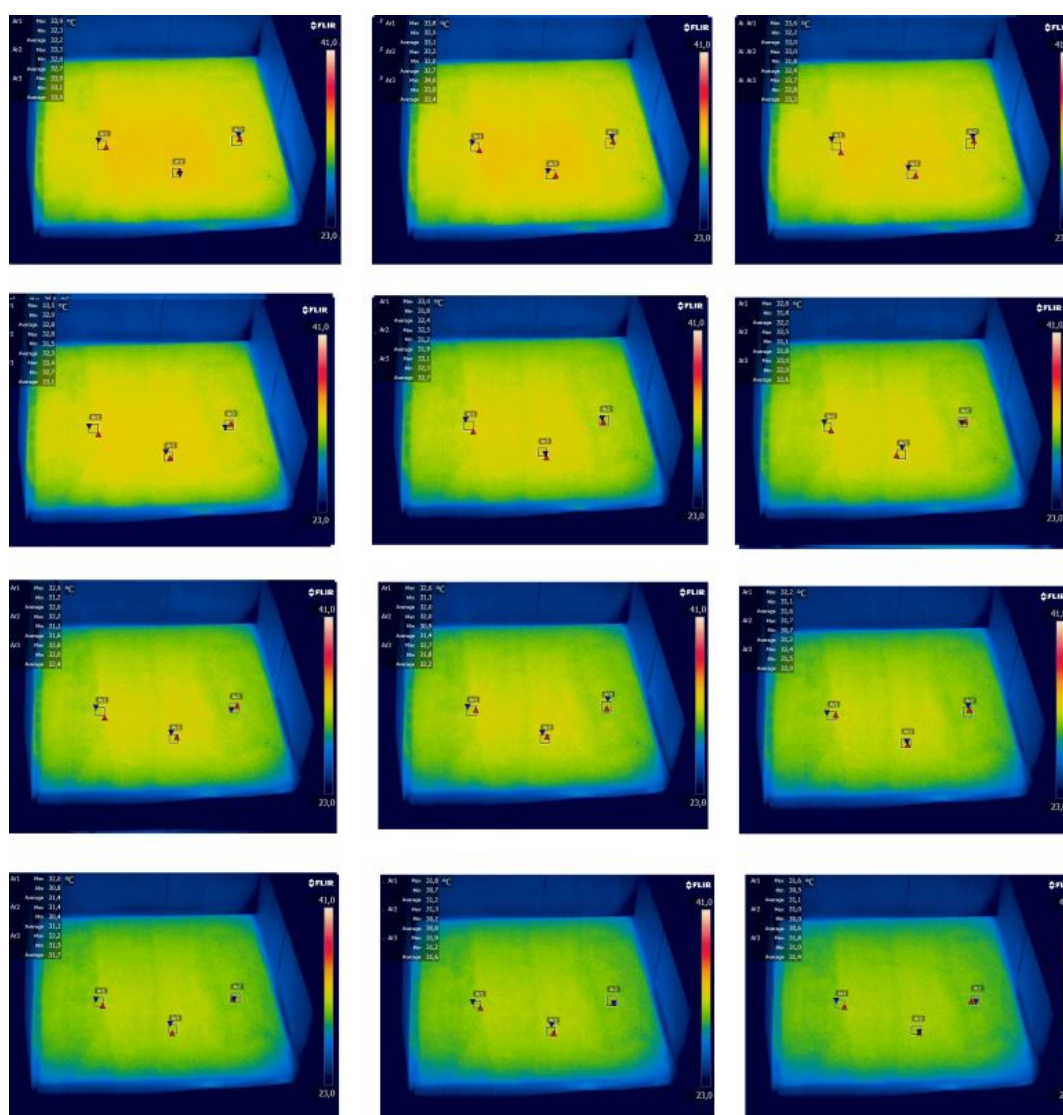


Fig. B.40: Termogramas para a detecção de empolamentos obtidos com a câmara termográfica a 60° com a normal à superfície do provete - período 60 minutos, aquecimento por condução.

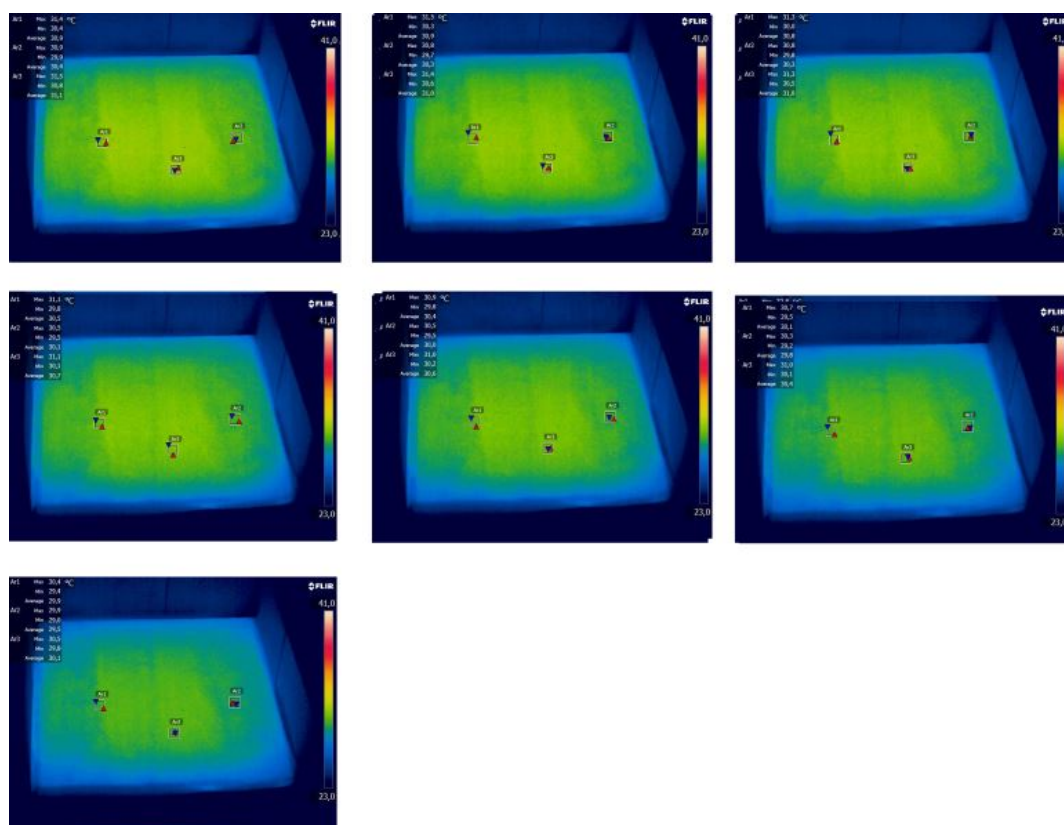
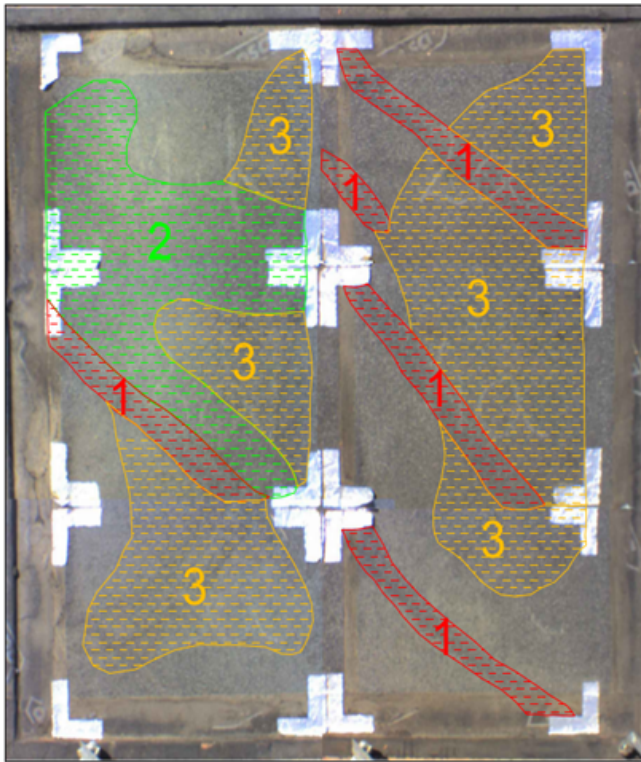


Fig. B.41: Termogramas para a detecção de empolamentos obtidos com a câmara termográfica a 60° com a normal à superfície do provete - período 60 minutos, aquecimento por condução.

B.5 Detecção de anomalias por termografia de infravermelhos - ensaios *in situ* com anomalias controladas

B.5.1 Mapeamento das anomalias



Legenda:

Empolamentos	Tipo
Visíveis	1 
Bolsas de ar com tamanho reduzido detectadas por toque	2 
Bolsas de ar com tamanho muito reduzido detectadas por toque	3 

Fig. B.42: Mapeamento das anomalias existentes no provete a).

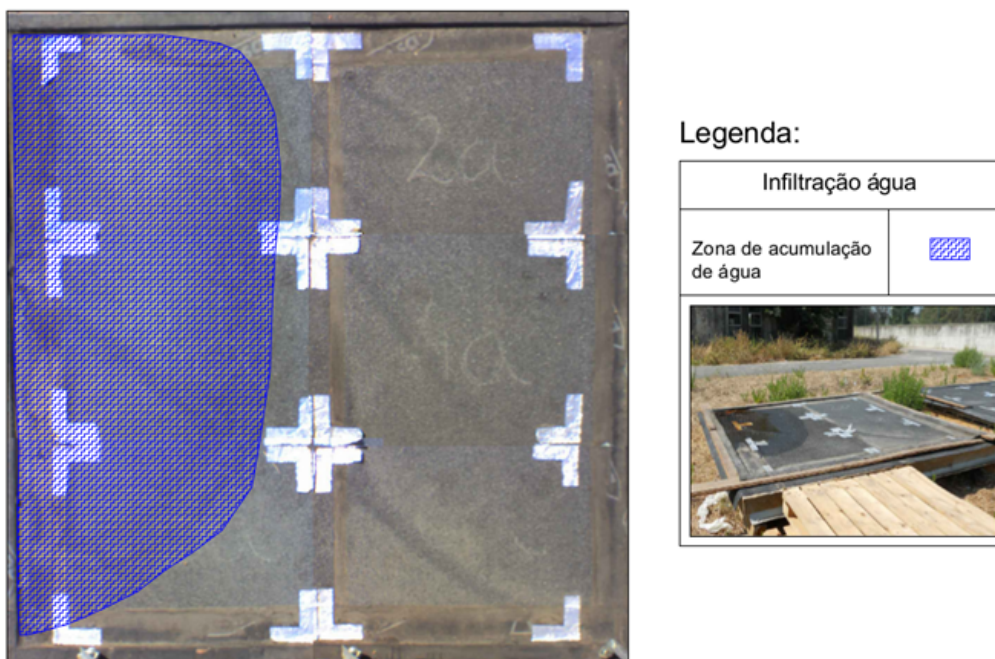


Fig. B.43: Locais com maior probabilidade de ocorrência de infiltração de água no provete *a*).

B.5.2 Detecção de empolamentos

1a	2a
3a	4a
5a	6a

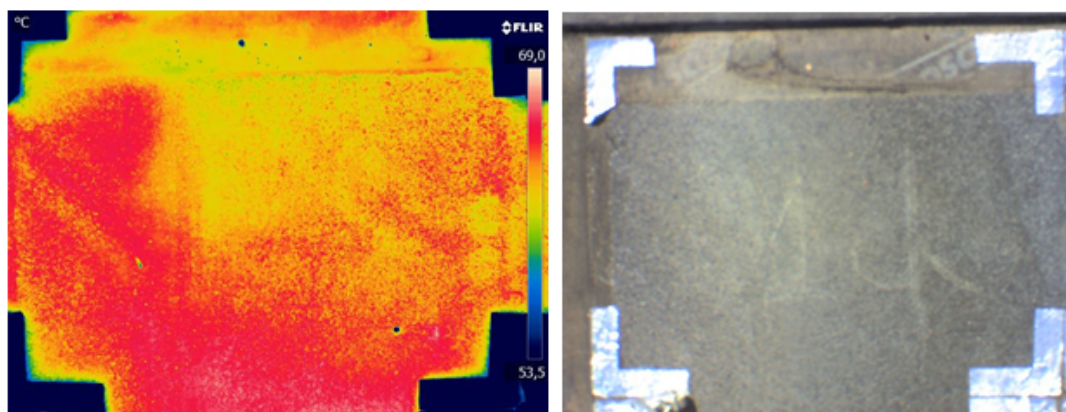


Fig. B.44: Termograma do rectângulo 1a - provete *a*) (esq.) e imagem real correspondente (dir.).

1a	2a
3a	4a
5a	6a

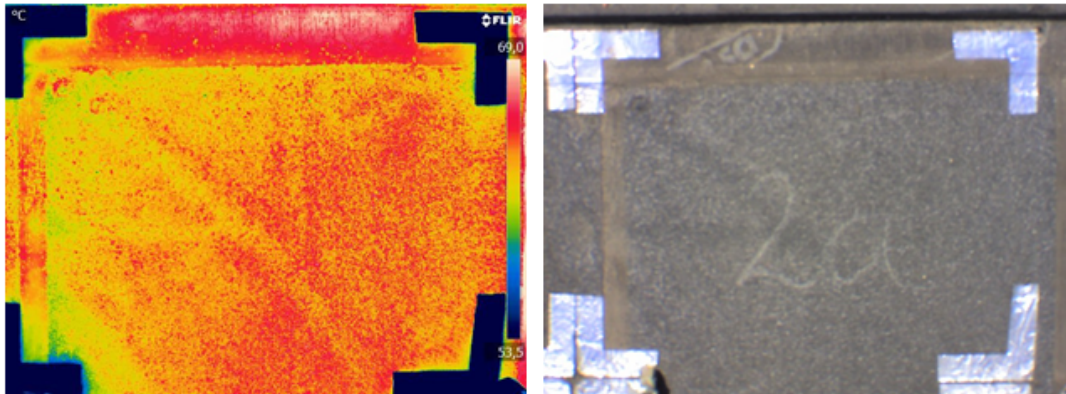


Fig. B.45: Termograma do rectângulo 2a - provete *a*) (esq.) e imagem real correspondente (dir.).

1a	2a
3a	4a
5a	6a

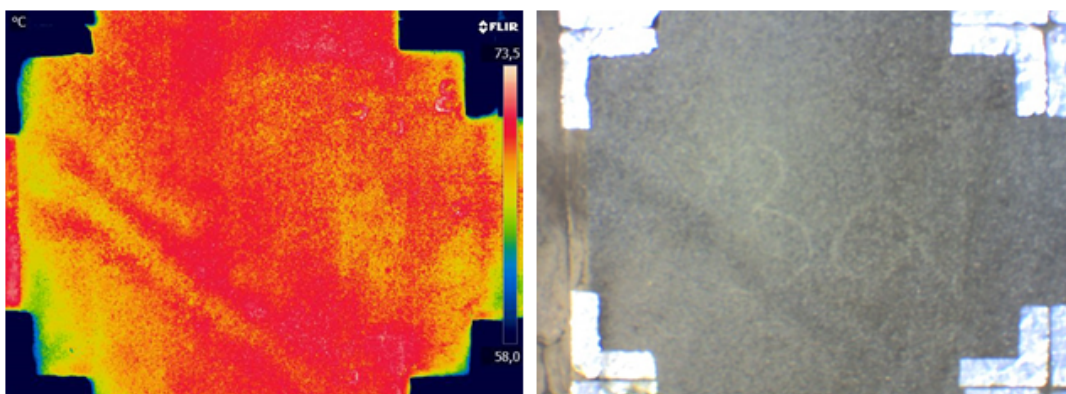


Fig. B.46: Termograma do rectângulo 3a - provete *a*) (esq.) e imagem real correspondente (dir.).

1a	2a
3a	4a
5a	6a

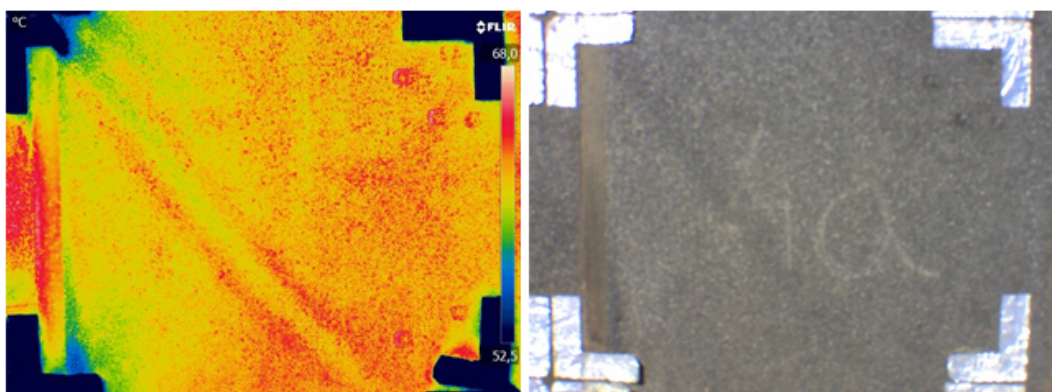


Fig. B.47: Termograma do rectângulo 4a - provete *a*) (esq.) e imagem real correspondente (dir.).

1a	2a
3a	4a
5a	6a

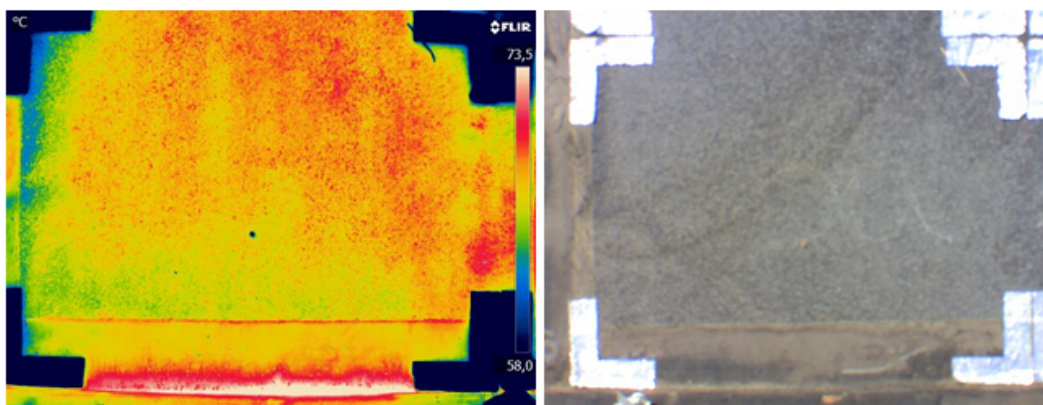


Fig. B.48: Termograma do rectângulo 5a - provete *a*) (esq.) e imagem real correspondente (dir.).

1a	2a
3a	4a
5a	6a

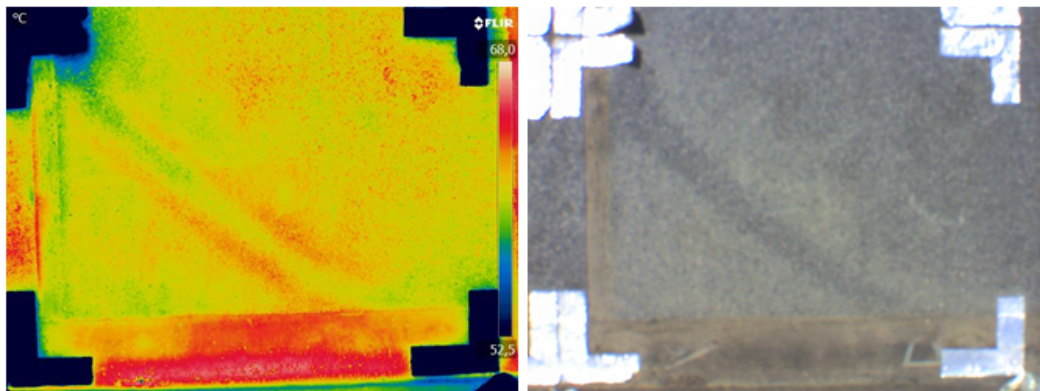


Fig. B.49: Termograma do rectângulo 6a - provete *a*) (esq) e imagem real correspondente (dir.).

B.5.3 Detecção de água

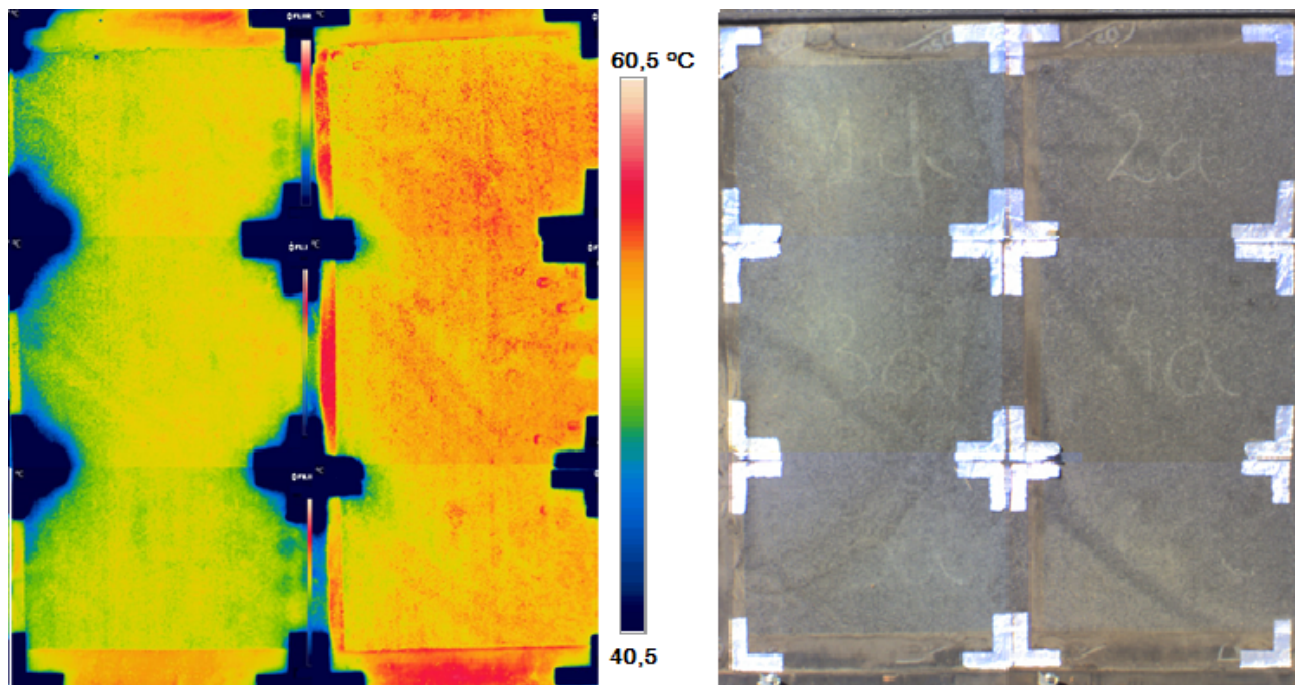


Fig. B.50: Imagem termográfica total do provete *a*) correspondente à detecção de água sob o revestimento de impermeabilização - período aquecimento (esq.) e imagem real correspondente (dir.).

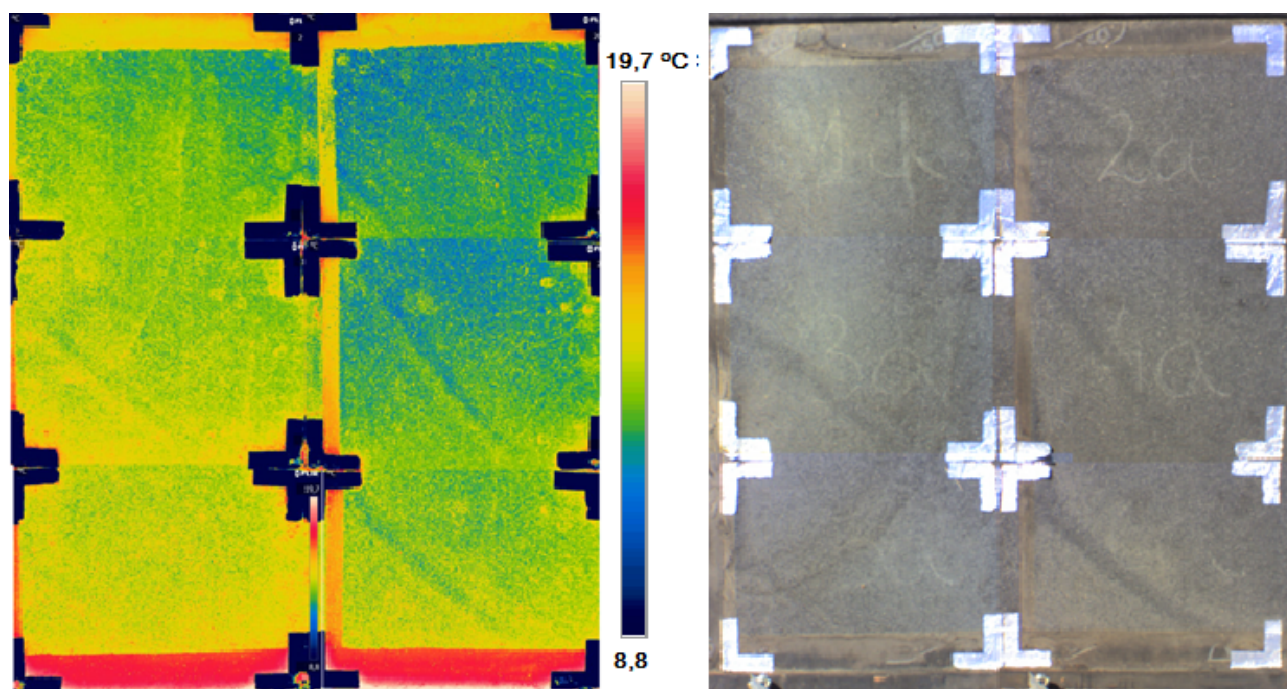


Fig. B.51: Imagem termográfica total do provete *a*) correspondente à detecção de água sob o revestimento de impermeabilização - período arrefecimento (esq) e imagem real (dir.).