

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Daniel Francisco Mendes Fernandes

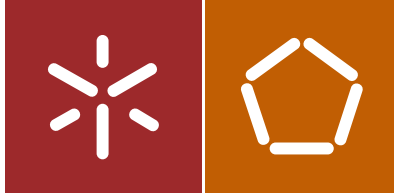
Estudo do aquecimento de misturas
betuminosas recorrendo a micro-ondas

Estudo do aquecimento de misturas
betuminosas recorrendo a micro-ondas

Daniel Francisco Mendes Fernandes

UMinho | 2016

novembro de 2016



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Daniel Francisco Mendes Fernandes

Estudo do aquecimento de misturas
betuminosas recorrendo a micro-ondas

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Jorge Carvalho Pais

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor Jorge Carvalho Pais, Diretor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, pela orientação científica, pelos conhecimentos e ensinamentos transmitidos ao longo da elaboração desta dissertação.

Ao Engenheiro Carlos Palha, responsável do laboratório de Vias de Comunicação da Universidade do Minho, agradeço todo o apoio prestado, a disponibilidade demonstrada, as ideias sugeridas e incentivo para a realização dos diversos ensaios laboratoriais.

Ao Hélder Torres, técnico do laboratório de Vias de Comunicação da Universidade do Minho, agradeço a disponibilidade demonstrada ao longo da realização dos ensaios laboratoriais.

Aos meus pais, por todo o apoio prestado ao longo desta caminhada. Obrigado pelos ensinamentos, pelo exemplo de vida, por estarem sempre ao meu lado e por me fazerem ver que com empenho e dedicação tudo se consegue.

A todos os meus amigos que me acompanharam neste percurso académico ao longo destes anos, com predominância a todos aqueles que estiveram ao meu lado nos momentos mais difíceis.

Estudo do aquecimento de misturas betuminosas recorrendo a micro-ondas

RESUMO

A utilização da radiação de micro-ondas no aquecimento de materiais começa a ganhar relevância, uma vez que é possível obter o mesmo efeito que o aquecimento tradicional, mas com poupanças de energia e tempos de processamento mais curtos.

O aquecimento por micro-ondas baseia-se na transferência de energia de um campo eletromagnético através da excitação dos dipolos moleculares no material em que estão a ser aplicadas as micro-ondas. Quando o campo elétrico é aplicado, as moléculas tendem a alinhar-se com o campo. Quando o campo elétrico é retirado, as moléculas voltam ao seu estado não alinhado, dissipando a energia absorvida em forma de calor.

Uma vez que as micro-ondas possuem a capacidade de penetração quase instantânea nos materiais a profundidades de vários centímetros ou mais, o calor é gerado ao longo do volume de todo o material. O resultado final acaba por se tratar de um aquecimento rápido e homogêneo do pavimento a profundidades consideráveis.

Através do uso desta tecnologia é possível realçar dois aspetos importantes: o aquecimento para a manutenção de estradas, nomeadamente a reparação de fendas, e o aquecimento de pavimento recuperado, o qual revela níveis de poluição do ar menores e um envelhecimento tardio do betume.

O presente trabalho tem em vista aprofundar o conhecimento do comportamento das misturas betuminosas quando aquecidas através de micro-ondas.

Além disto, e com base no estudo laboratorial descrito, espera-se que num futuro próximo possa ser possível a obtenção de um modelo que permita a aplicação desta técnica em situações de reabilitação de pavimentos de acordo com o comportamento de todos os elementos presentes em obra.

Palavras-chave: Pavimentos Rodoviários, Micro-ondas, Aquecimento, Self-healing, Misturas Betuminosas

Study of heating asphalt mixtures using microwave

ABSTRACT

The use of microwave radiation for heating materials starts to become more relevant, since it is possible to obtain the same effect as the traditional heating, but with energy savings and shorter processing times.

The heating by microwave is based on the transfer of energy from an electromagnetic field through the excitation of molecular dipoles in the material in which the microwaves are being applied. When the electric field is applied, the molecules tend to align themselves with the field. When the electric field is removed, the molecules return to their unaligned state, dissipating the energy absorbed as heat.

Since the microwaves have the nearly instantaneous ability to penetrate the material at depths of several centimeters or more, the heat is generated along the volume of all material. The final result turns out to be a fast and homogenous heating pavement at considerable depths.

By using this technology, it is possible to highlight two important aspects: the heating for the maintenance of roads, including the repair of cracks, and the heating of recovered pavement, which reveals lower levels of air pollution and late aging bitumen.

The present study has the purpose of deepening the knowledge of the behavior of bituminous mixtures when heated by microwave.

In addition, based on the described laboratory studies, it is expected that in the near future it may be possible to obtain a model that allows the application of this technique in pavement rehabilitation situations according to the behavior of all the elements present in the work.

Keywords: Pavements, Microwave, Heating, Self-healing, Bituminous Mixtures

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento geral	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura e conteúdo da dissertação	2
2. Pavimentos Rodoviários	5
2.1. Introdução	5
2.2. Tipologias de pavimentos	9
2.3. Degradação de pavimentos	12
2.4. Reabilitação de pavimentos rodoviários	15
2.4.1 Técnicas de reabilitação das características superficiais	16
2.4.2 Técnicas de reabilitação das características estruturais	21
2.5. Misturas betuminosas.....	24
3. Aquecimento de misturas betuminosas com micro-ondas.....	33
3.1. Micro-ondas	33
3.2. Aquecimento	34
3.3. Aquecimento com adição de aditivos metálicos.....	41
3.4. Aquecimento com adição de aditivos químicos.....	44
4. Materiais e métodos	47
4.1. Introdução	47
4.2. Materiais	47

4.3. Equipamentos.....	49
4.4. Metodologia.....	53
5. Resultados e Análises	59
5.1. Introdução	59
5.2. Granito	60
5.2.1. Provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm.....	60
5.2.2. Provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm.....	67
5.2.3. Provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm.....	74
5.2.4. Provete de mistura betuminosa drenante	81
5.2.5. Provete de mistura betuminosa modificada com borracha proveniente de pneus usados	90
5.2.6. Provete de mistura betuminosa com 17% de vazios.....	96
5.3. Calcário.....	101
5.4. Basalto.....	108
5.5. Influência do agregado utilizado.....	115
5.6. Estudo da contribuição térmica do agregado	117
5.6.1. Agregado britado fino do tipo 4/6.....	117
5.6.2. Agregado britado médio do tipo 6/14	121
5.6.3. Comparação do comportamento dos diferentes agregados.....	126
5.7. Betume	130
6. Considerações finais	135
6.1. Conclusões	135

6.2. Desenvolvimentos futuros	136
Referências bibliográficas.....	139
Sites Consultados	145
ANEXOS	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Constituição de uma estrutura tipo de um pavimento rodoviário	6
Figura 2.2: Distribuição de tensões verticais devido à passagem de uma roda (AI, 1981)	7
Figura 2.3: Constituição e ações num pavimento rodoviário (Branco et al., 2008)	8
Figura 2.4: Pavimento flexível: constituição e comportamento (Branco et al, 2005)	11
Figura 2.5: Rodeira de grande raio (Oliveira, J., 2013)	15
Figura 2.6: Fendilhamento do tipo pele de crocodilo (Oliveira, J., 2013)	15
Figura 2.7: Diversos tipos de revestimentos betuminosos superficiais (Vicente, A. M, 2006)	18
Figura 2.8: Estratégias normalmente adotadas na reabilitação estrutural de pavimentos fendilhados (Minhoto, 2005)	22
Figura 2.9: a) mistura tradicional; b) mistura porosa (Kraemer et al., 1996)	30
Figura 3.1: Elementos de um forno micro-ondas (Site Consultado nº1)	36
Figura 3.2: Aquecimento com micro-ondas: (a) e (b) - antes e depois da irradiação com prato giratório; (c) e (d) - antes e depois da irradiação sem prato giratório (Rosini et al, 2004)	37
Figura 3.3: Relação Tempo-Temperatura no aquecimento de agregados molhados (Terrel e Al-Ohaly, 1987)	39
Figura 3.4: Efeito do índice de humidade no aquecimento no micro-ondas (Terrel e Al-Ohaly, 1987)	40
Figura 3.5: Efeito do índice de humidade e tempo de aquecimento de diferentes agregados no micro-ondas (Terrel e Al-Ohaly, 1987)	40
Figura 3.6: Evolução da temperatura à superfície das misturas betuminosa com lâ de aço de 5 mm (a) e 10 mm (b) (Galego et al, 2013)	42

Figura 3.7: Temperatura interna após 120 segundos de aquecimento em micro-ondas em misturas com lã de aço de 5 mm (a) e 10 mm (b) (Galego et al, 2013).....	42
Figura 3.8: Efeito da adição de carbono preto a uma mistura betuminosa no aquecimento no microondas por 10 minutos (Terrel e Al-Ohaly, 1987)	45
Figura 4.1: Caixa de madeira utilizada nos ensaios	48
Figura 4.2: Sondas para altas temperaturas.....	48
Figura 4.3: Micro-ondas.....	49
Figura 4.4: Hanna Instruments.....	50
Figura 4.5: Termómetro infravermelho com mira laser.....	50
Figura 4.6: Termómetro Calex Soft.....	51
Figura 4.7: Exemplo da utilização do termómetro Calex Soft.....	51
Figura 4.8: Diâmetro medido versus distância	52
Figura 4.9: dataTaker DT800 (Site consultado nº6)	53
Figura 4.10: Distribuição dos furos	54
Figura 4.11: Espaçamento entre sondas.....	54
Figura 4.12: Exemplo do posicionamento dos provetes no interior do micro-ondas	55
Figura 4.13: Perfis na análise da temperatura à superfície	56
Figura 4.14: Análise da evolução da temperatura dos provetes à superfície	57
Figura 4.15: Aquecimento de provetes em estufa.....	58
Figura 5.1: Provede de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm	60

Figura 5.2: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts.....	61
Figura 5.3: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts.....	62
Figura 5.4: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts.....	63
Figura 5.5: Aquecimento em estufa do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm	65
Figura 5.6: Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft	66
Figura 5.7: Influência da potência do micro-ondas no aquecimento do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm.....	67
Figura 5.8: Provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm	68
Figura 5.9: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts.....	68
Figura 5.10: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts.....	70
Figura 5.11: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts.....	71
Figura 5.12: Aquecimento em estufa do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm.....	72
Figura 5.13: Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft	73

Figura 5.14: Influência da potência do micro-ondas no aquecimento do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm.....	74
Figura 5.15: Provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm.....	75
Figura 5.16: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts.....	75
Figura 5.17: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts.....	77
Figura 5.18: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts.....	78
Figura 5.19: Aquecimento em estufa do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm.....	79
Figura 5.20: Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft.....	80
Figura 5.21: Influência da potência do micro-ondas no aquecimento do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm.....	81
Figura 5.22: Provete de mistura betuminosa drenante.....	82
Figura 5.23: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa drenante através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts.....	82
Figura 5.24: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa drenante através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts.....	84
Figura 5.25: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa drenante através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts.....	86
Figura 5.26: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa drenante através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts até aos 140° C.....	87

Figura 5.27: Aquecimento em estufa do provete de mistura betuminosa drenante	88
Figura 5.28: Influência da potência do micro-ondas no aquecimento do provete de mistura betuminosa drenante	89
Figura 5.29: Provete de mistura betuminosa modificada com borracha proveniente de pneus usados.....	90
Figura 5.30: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa modificada com borracha através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts.....	90
Figura 5.31: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa modificada com borracha através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts.....	91
Figura 5.32: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa modificada com borracha através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts.....	93
Figura 5.33: Aquecimento em estufa do provete de mistura betuminosa modificada com borracha.....	94
Figura 5.34: Influência da potência do micro-ondas no aquecimento do provete de mistura betuminosa modificada com borracha	95
Figura 5.35: Provete de mistura betuminosa com 17% de vazios	96
Figura 5.36: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com 17% de vazios através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts.....	96
Figura 5.37: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com 17% de vazios através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts.....	98
Figura 5.38: Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com 17% de vazios através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts.....	99
Figura 5.39: Aquecimento em estufa do provete de mistura betuminosa com 17% de vazios	100

Figura 5.40: Influência da potência do micro-ondas no aquecimento do provete de mistura betuminosa com 17% de vazios	101
Figura 5.41: Provete de calcário	102
Figura 5.42: Evolução da temperatura do provete de calcário através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts	103
Figura 5.43: Evolução da temperatura do provete de calcário através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts	104
Figura 5.44: Evolução da temperatura do provete de calcário através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts	105
Figura 5.45: Aquecimento em estufa do provete de calcário.....	106
Figura 5.46: Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de calcário através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft ..	107
Figura 5.47: Influência da potência do micro-ondas no aquecimento do provete de calcário	108
Figura 5.48: Provete de basalto.....	109
Figura 5.49: Evolução da temperatura do provete de basalto através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts	109
Figura 5.50: Evolução da temperatura do provete de basalto através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts	111
Figura 5.51: Evolução da temperatura do provete de basalto através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts	112
Figura 5.52: Aquecimento em estufa do provete de basalto	113
Figura 5.53: Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de basalto através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft ..	114
Figura 5.54: Influência da potência do micro-ondas no aquecimento do provete de basalto ..	115

Figura 5.55: Influência do agregado utilizado	116
Figura 5.56: Agregado 4/6 na caixa de dimensões 38x5x6cm ³	117
Figura 5.57: Agregado 4/6 na caixa de dimensões 5x5x6cm ³	118
Figura 5.58: Evolução da temperatura do agregado 4/6 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts.....	118
Figura 5.59: Evolução da temperatura do agregado 4/6 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts.....	119
Figura 5.60: Evolução da temperatura do agregado 4/6 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts.....	120
Figura 5.61: Influência da potência do micro-ondas no aquecimento de agregado do tipo 4/6	121
Figura 5.62: Agregado 4/6 na caixa de dimensões 38x5x6cm ³	122
Figura 5.63: Agregado 6/14 na caixa de dimensões 5x5x6cm ³	122
Figura 5.64: Evolução da temperatura do agregado 6/14 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts.....	123
Figura 5.65: Evolução da temperatura do agregado 6/14 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts.....	124
Figura 5.66: Evolução da temperatura do agregado 6/14 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts.....	125
Figura 5.67: Influência da potência do micro-ondas no aquecimento de agregado do tipo 6/14	126
Figura 5.68: Evolução da temperatura dos agregados 4/6 e 6/14 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts	127

Figura 5.69: Evolução da temperatura dos agregados 4/6 e 6/14 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts	128
Figura 5.70: Evolução da temperatura dos agregados 4/6 e 6/14 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts	129
Figura 5.71: Amostra de betume utilizada.....	130
Figura 5.72: Evolução da temperatura do betume através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts	131
Figura 5.73: Evolução da temperatura do betume através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts	132
Figura 5.74: Evolução da temperatura do betume através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts	133
Figura 5.75: Influência da potência do micro-ondas no aquecimento de betume	134

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1: Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (Branco et al, 2005)	10
Quadro 2.2: Famílias e tipos de degradações (Oliveira, J., 2013)	14
Quadro 2.3: Designação das Misturas Betuminosas (CE EP, 2014)	25
Quadro 2.4: Tipologia adotada para as misturas betuminosas fabricadas a quente (MACOPAV, JAE)	32
Quadro 4.1: Processo de aquecimento	56
Quadro 5.1: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.2	61
Quadro 5.2: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.3	62
Quadro 5.3: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.4	64
Quadro 5.4: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.9	69
Quadro 5.5: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.10	70
Quadro 5.6: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.11	71
Quadro 5.7: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.16	76
Quadro 5.8: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.17	77
Quadro 5.9: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.18	78
Quadro 5.10: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.23	83
Quadro 5.11: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.24	84
Quadro 5.12: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.25	86
Quadro 5.13: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.26	87

Quadro 5.14: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.30	91
Quadro 5.15: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.31	92
Quadro 5.16: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.32	93
Quadro 5.17: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.36	97
Quadro 5.18: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.37	98
Quadro 5.19: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.38	99
Quadro 5.20: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.42	103
Quadro 5.21: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.43	104
Quadro 5.22: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.44	105
Quadro 5.23: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.49	110
Quadro 5.24: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.50	111
Quadro 5.25: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.51	112
Quadro 5.26: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.55	116
Quadro 5.27: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.58	119
Quadro 5.28: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.59	120
Quadro 5.29: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.60	120
Quadro 5.30: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.64	123
Quadro 5.31: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.65	124
Quadro 5.32: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.66	125
Quadro 5.33: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.68	127

Quadro 5.34: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.69	128
Quadro 5.35: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.70	129
Quadro 5.36: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.72	131
Quadro 5.37: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.73	132
Quadro 5.38: Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.74	133

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento geral

O presente trabalho refere-se a uma dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho e intitulada “*Estudo do aquecimento de misturas betuminosas recorrendo a micro-ondas*”.

Nas últimas décadas, o uso da radiação de micro-ondas tem encontrado diversas aplicações em vários processos industriais, devendo-se isto principalmente ao rápido aquecimento em toda a espessura de um material com reduzidos gradientes térmicos, que permitem reduzir o tempo de processamento e com isso economizar energia.

As vantagens globais do aquecimento por micro-ondas podem ser explicadas devidas aos seguintes aspetos:

- Não existem emissões de poluentes aéreos ou líquidos;
- Verifica-se um aquecimento muito rápido dos materiais;
- O aquecimento é mais fácil de controlar e existe um isolamento das condições de risco;
- Os gradientes térmicos verificados são quase insignificantes;
- Existe um controlo rigoroso na aplicação automática do aquecimento;
- Verifica-se uma boa capacidade de penetração de micro-ondas o que permite o aquecimento volumétrico de amostras;
- Verifica-se uma ação direta sobre as ligações polares e entropia do material a ser aquecida.

Autores como Liu et al. (2010) aqueceram misturas betuminosas que anteriormente encontravam-se fendilhadas, verificando que o aquecimento a temperaturas relativamente elevadas compreendidas entre 70 e 120 ° C conduziu, em alguns casos, a até 100% de auto-cura.

Little e Bhasin (2007) explicaram que o dano nas misturas betuminosas ocorre quando uma tensão é induzida, sendo que deve ser suficientemente grande para gerar danos permanentes. Imediatamente após a remoção da carga que gerou o dano, ambas as faces da fenda estão em

contato, verificando-se de seguida a difusão de moléculas a partir de uma face para a outra. Este processo acontece, nomeadamente enquanto não há mais cargas a ser aplicadas, até que a fenda desapareça completamente e o material reparado volte a possuir o nível de resistência tal como nos instantes iniciais. No entanto, a passagem repetida das cargas do tráfego evita que esta recuperação das misturas betuminosas se proceda, a qual apenas é reduzida pelo efeito da temperatura, sendo também bem conhecido que à medida que a temperatura aumenta, torna-se possível aumentar o efeito de cura dos pavimentos rodoviários.

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consiste no estudo do efeito da aplicação de micro-ondas no aquecimento das misturas betuminosas. Pretende-se analisar o aquecimento em função dos vários tipos de misturas betuminosas, dos diferentes tipos de agregados, e relacionar o tempo de aquecimento com a potência do micro-ondas utilizada.

Pretende-se também perceber o efeito da espessura do material no aquecimento por micro-ondas, bem como o efeito nos agregados e no betume.

Realizando o aquecimento através de radiação de micro-ondas e através do método convencional, isto é, aquecimento em estufa previamente aquecida, pretende-se proceder a uma comparação entre os dois métodos, com o objetivo de se perceber qual seria o mais rápido a atingir altas temperaturas, nomeadamente acima dos 100 °C.

1.3. Estrutura e conteúdo da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos. O presente capítulo (Capítulo 1) introduz o tema da dissertação e estabelece os objetivos principais a alcançar com o trabalho desenvolvido.

O Capítulo 2 remete-se à história global dos pavimentos rodoviários. Relata-se as tipologias de pavimentos existentes, as degradações que surgem ao longo da vida de um pavimento, assim como as técnicas de reabilitação aplicadas para emendar essas degradações. Uma vez que o tema da dissertação se trata do aquecimento de misturas betuminosas, ainda neste capítulo, são apresentados os vários tipos de misturas betuminosas e as suas propriedades.

No Capítulo 3 realiza-se um levantamento bibliográfico de trabalhos realizados por diversos autores relativamente ao aquecimento de misturas betuminosas através de radiação de micro-

ondas. Através disso é possível verificar o comportamento de diversas misturas betuminosas e também a opinião de vários autores com vista à introdução de micro-ondas na reabilitação de misturas betuminosas.

No Capítulo 4 é possível observar os materiais e métodos utilizados para a realização desta dissertação. Para a elaboração deste estudo foi utilizado um micro-ondas doméstico no qual se aqueceu diversos provetes. Para que se obtivesse um fator de comparação, também se utilizou uma estufa para proceder ao aquecimento de provetes. Através disso foi possível verificar os diferentes comportamentos para cada mistura betuminosa ao longo do aquecimento gerado. Ainda neste capítulo, enuncia-se a metodologia utilizada durante os ensaios laboratoriais.

O Capítulo 5 resume-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos no estudo realizado. Procede-se a uma análise dos resultados obtidos no que diz respeito ao comportamento dos diversos tipos de misturas betuminosas utilizadas no presente trabalho.

Por fim, no Capítulo 6, apresentam-se as considerações finais da presente dissertação, realizando um resumo do trabalho elaborado, assim como aspetos importantes para o desenvolvimento de trabalhos futuros no âmbito do aquecimento de misturas betuminosas através de micro-ondas.

2. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

2.1. Introdução

As vias de comunicação podem ser consideradas como uma consequência da civilização. A história constata que as primeiras redes viárias surgiram no tempo dos romanos, traduzindo-se na maior contribuição para as comunicações terrestres na Europa até aos séculos XVII e XVIII (Barbosa, 1984).

Em 1775, em França, foi apresentado pela primeira vez por Treseguet, de forma pormenorizada a construção dos pavimentos em três camadas de materiais pétreos com dimensões decrescentes aplicados do fundo até à superfície, com o elemento resistente constituído por uma fundação de agregados colocados à mão (Barbosa, 1984).

Em 1820, o escocês Mac Adam indica a execução de camadas sucessivas de pedras britadas com menores dimensões, induzindo de forma clara que o pavimento constitui um colchão destinado a degradar as cargas aplicadas à superfície. O método aplicado por Mac Adam foi um fator tão importante que a designação macadame aparece através de uma adaptação do seu nome (Barbosa, 1984).

Com a invenção dos primeiros automóveis, através da idealização de veículos impulsionados a vapor, fez com que se criassem novas exigências à manutenção das estradas devido às velocidades cada vez mais elevadas praticadas por estes. Surgiu então um novo problema na construção dos pavimentos, uma vez que era necessário uma maior regularidade e conforto de circulação, para os condutores, e também para proteção dos peões devido à projeção de pedras soltas e poeiras. Inicia-se, assim, a aplicação superficial de ligantes hidrocarbonados, isto é, alcatrão, asfaltos naturais e betumes (Barbosa, 1984).

Em Portugal, a evolução mais notória relativamente aos pavimentos deu-se com a criação do Plano Rodoviário Nacional 85 (DI 380/85) e também com a adesão à CEE em 1986. Passados uns anos foi definido um novo plano, o Plano Rodoviário Nacional 2000 (DL222/98) e com isso foi possível apurar um aumento considerável na extensão da rede rodoviária nacional (Freitas e Pereira, 2001).

Com o passar do tempo são cada vez mais exigidas melhores qualidades de aspeto funcional e estrutural. Estas exigências assumiram um papel importante em relação à caracterização final, a nível funcional e estrutural, de modo que o caderno de encargos em vigor realça que o controlo de qualidade dos pavimentos recém-construídos seja realizado ao nível da avaliação da capacidade de carga, da textura, da irregularidade e do coeficiente de atrito da camada de desgaste.

Quanto à segurança de circulação, o fator mais relevante prende-se à resistência à derrapagem. O constante perigo devido à falta de aderência entre os pneus e um pavimento molhado, traduz-se em muitas vezes a efeitos de hidroplanagem e como consequência a acidentes.

Posto isto, pode afirmar-se que os pavimentos são constituídos por camadas ligadas e não ligadas que são colocadas sobre o solo de fundação, capaz de conferir à superfície regularidade, rugosidade suficiente e resistência ao desgaste, na qual se traduz em segurança e conforto à circulação rodoviária. Estas camadas também possuem capacidade de proteger as camadas inferiores das ações do clima, em que se revela um aspeto importante na resistência global da estrutura.

Na Figura 2.1 esquematiza-se uma estrutura tipo de um pavimento rodoviário.

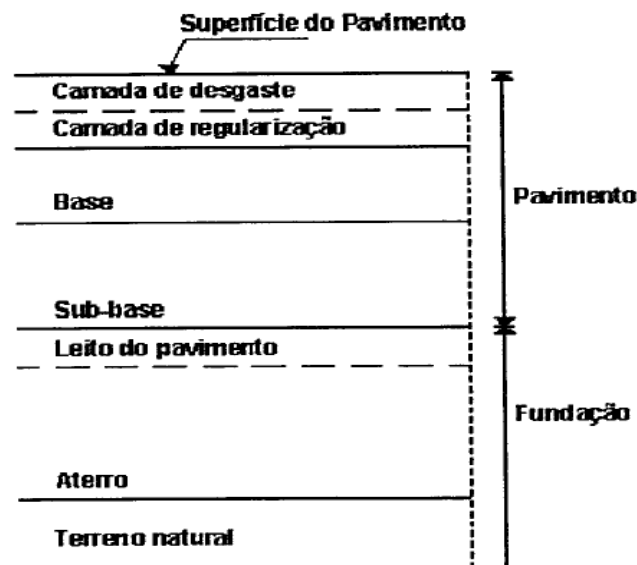


Figura 2.1 - Constituição de uma estrutura tipo de um pavimento rodoviário

Os pavimentos permitem que as tensões verticais, provocadas pela passagem de veículos, sejam transmitidas de forma gradual ao solo de fundação, isto é, à medida que uma carga é aplicada

à superfície, essa carga vai-se dissipando através das camadas do pavimento até atingir o solo de fundação.

É possível observar na Figura 2.2 a distribuição das tensões verticais (a) e horizontais (b) presentes num pavimento no momento em que uma roda de um veículo passa sobre um pavimento.

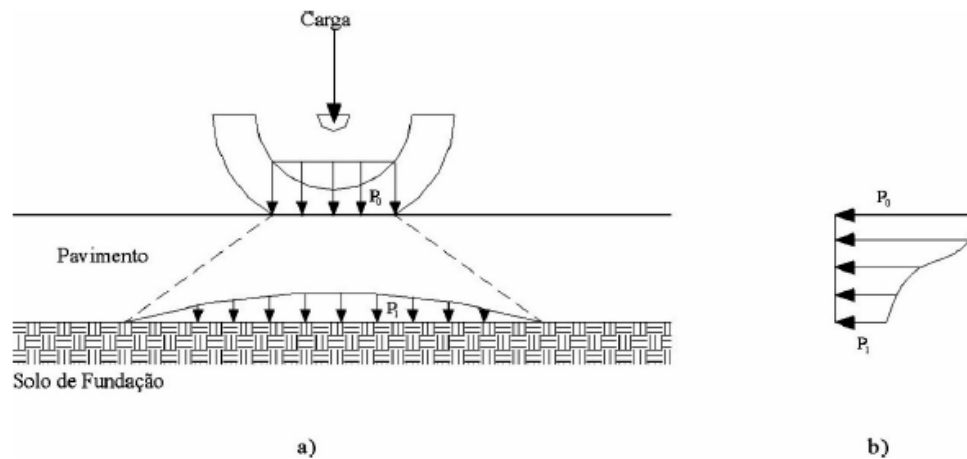


Figura 2.2 - Distribuição de tensões verticais devido à passagem de uma roda (AI, 1981)

Através da análise da Figura 2.2 é possível verificar que a tensão P_0 (à superfície do pavimento) é maior do que a tensão P_1 (no topo do solo de fundação), o que consiste na redistribuição de cargas originadas pelo tráfego.

A distribuição das cargas deve-se à rigidez das camadas existentes no pavimento e à espessura de cada uma delas. Um aumento destes fatores faz com que a redistribuição das cargas seja maior, o que se traduz numa diminuição das pressões registadas ao nível do solo de fundação. Tendo em atenção este aspeto, o dimensionamento de pavimentos rodoviários é projetado tendo em conta, como principal objetivo a proteção do solo de fundação devido às cargas aplicadas pelos veículos.

Segundo a análise da Figura 2.3, um pavimento rodoviário encontra-se sujeito a dois tipos de ações, as provocadas pelos veículos e as ações dos agentes climáticos. É possível verificar que existem três zonas importantes no que diz respeito ao estudo de um pavimento, quando este se encontra submetido às ações dos veículos e dos agentes climáticos.

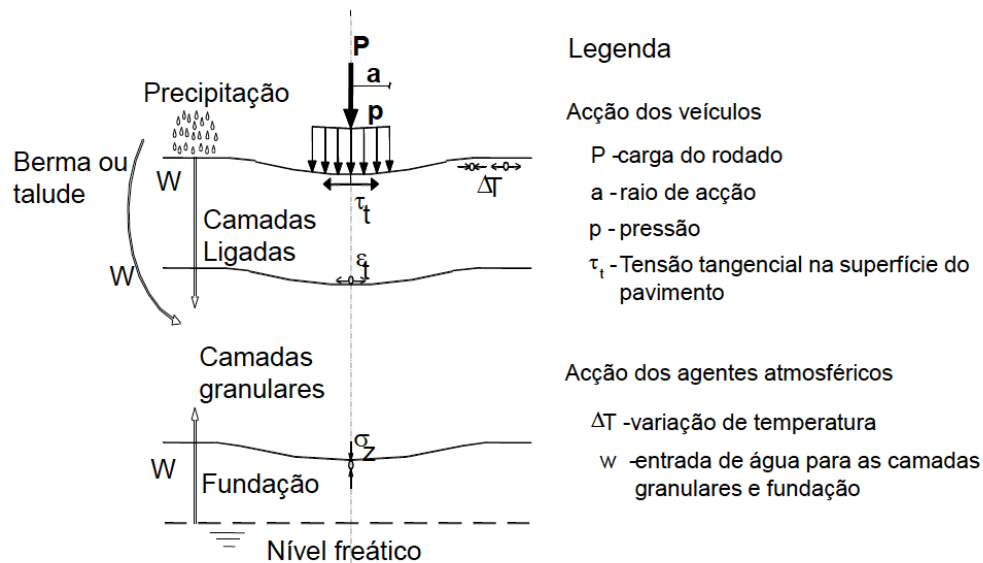


Figura 2.3 - Constituição e ações num pavimento rodoviário (Branco et al., 2008)

A primeira zona diz respeito à zona da superfície do pavimento, na qual surge uma tensão tangencial, que poderá fazer com que se dê uma desagregação ou desgaste da camada superficial do pavimento.

A segunda zona relevante prende-se ao fundo das camadas ligadas, uma vez que se verifica o aparecimento de tensões horizontais de tração que podem provocar fendilhamento no pavimento, propagável até à superfície.

Por fim, a terceira zona refere-se ao topo do solo de fundação, onde estão presentes esforços de compressão verticais, os quais poderão provocar no pavimento deformações permanentes. É possível verificar este tipo de acontecimentos quando se está perante rodeiras à superfície dos pavimentos.

Quando se pretende dimensionar um pavimento rodoviário, são calculados os esforços de serviço no fundo das camadas ligadas e no topo do solo de fundação e comparam-se os mesmos com os esforços reais devido à intensidade de tráfego e às condições climáticas.

Para os cálculos do tráfego apenas é considerado o efeito do tráfego de veículos pesados, no qual se inserem os veículos cujo peso bruto é igual ou superior a 3tf.

Para efeitos de dimensionamento, analisa-se o tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, por sentido de circulação na via mais solicitada por esses veículos e com este prevê-se o número equivalente de eixos-padrão para o período de vida do pavimento.

Quando se prevê que o tráfego num pavimento seja lento e pesado, será necessário aumentar a espessura do pavimento, ou reforçá-lo com materiais melhores e mais resistentes.

No que diz respeito aos agentes climáticos, para dimensionamento do pavimento interessa a temperatura no pavimento, a qual é função da temperatura do ar, da radiação solar e da velocidade do vento à superfície do pavimento. No entanto também deve ter-se em atenção o efeito da água, tanto na superfície do pavimento como na sua fundação e ao longo das camadas granulares.

2.2. Tipologias de pavimentos

Normalmente consideram-se três tipos de pavimentos, de acordo com os materiais utilizados na sua composição (Inir, 2012):

- Pavimentos flexíveis, nos quais as camadas superiores são constituídas por misturas betuminosas, sendo as camadas seguintes próximas do leito do pavimento em materiais granulares;
- Pavimentos semirrígidos, os quais nas camadas superiores são compostos por misturas betuminosas, e as camadas entre as camadas betuminosas e o leito do pavimento contêm materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos, com elevada influência na capacidade de carga do pavimento;
- Pavimentos rígidos, os quais consistem na aplicação de um betão de cimento de elevada resistência como camada de desgaste.

No Quadro 2.1 é possível observar os tipos de pavimentos em função dos materiais existentes para cada tipo e da deformabilidade a que o pavimento está sujeito.

Quadro 2.1 - Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (Branco et al, 2005)

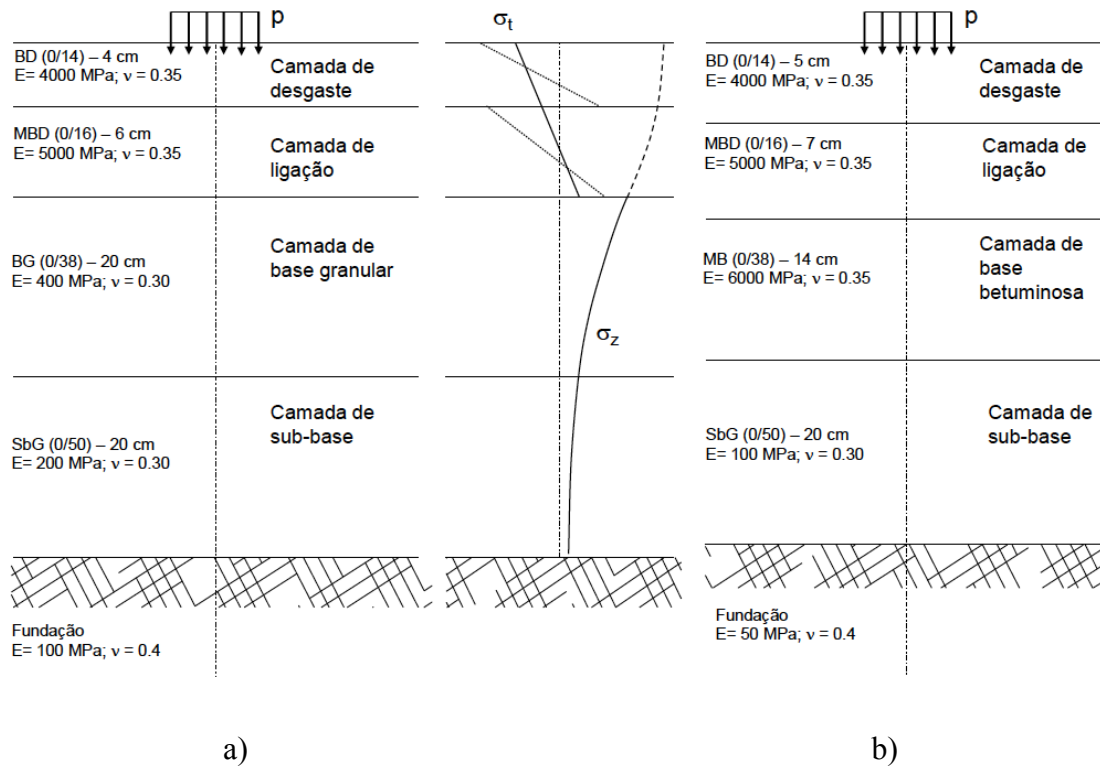
Tipo de Pavimento	Materiais (ligante)	Deformabilidade
Flexível	Hidrocarbonados e granulares	Elevada
Rígido	Hidráulicos e granulares	Muito reduzida
Semirrígido	Hidrocarbonados, hidráulicos e granulares	Reduzida

No entanto, é possível encontrar uma vasta gama de estruturas de pavimentos na rede rodoviária, das quais podem-se realçar os seguintes (Inir, 2012):

- Pavimento misto, o qual é constituído por misturas betuminosas assentes sobre materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos. Contém semelhanças com os pavimentos semirrígidos, mas a relação de espessura das misturas betuminosas é cerca de metade relativamente à espessura total do pavimento;
- Pavimento inverso, semelhante ao semirrígido, no entanto contém uma camada com material granular não tratado entre as camadas das misturas betuminosas e os materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos.
- Outros tipos, em que a camada de desgaste é constituída por cubos em pedra ou betão de cimento e a camada seguinte por materiais granulares não tratados ou materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos. Este tipo de pavimentos é muito usual em zonas como passadeiras de peões e passeios.

Os pavimentos flexíveis são constituídos por camadas superiores formadas por misturas betuminosas, isto é, com materiais estabilizados com ligantes hidrocarbonados, normalmente betume asfáltico, seguidas de uma ou duas camadas de material granular.

A Figura 2.4 mostra duas estruturas de pavimentos flexíveis: estrutura a), realizada para tráfego reduzido, assumindo uma fundação com elevada capacidade de suporte, e estrutura b), para tráfego intenso e com uma fundação com reduzida capacidade de suporte. Através da análise da figura é possível observar a espessura, material e valores típicos das características de deformabilidade (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) para cada camada.



Legenda:

BD: Betão betuminoso em camada de desgaste

MBD: Mistura betuminosa densa em camada de regularização

MB: Macadame betuminoso em camada de base

BG: Base granular

SbG: Sub-base granular em material britado

Figura 2.4 - Pavimento flexível: constituição e comportamento (Branco et al, 2005)

As várias camadas constituintes de um pavimento flexível podem ser descritas da seguinte forma (Branco et al, 2011):

- Camada de desgaste – trata-se da camada superior do pavimento na qual o tráfego circula diretamente. Deve ser constituída por uma superfície regular, com rugosidade suficiente e boa resistência ao desgaste, transmitindo as condições de segurança e conforto necessárias aos utilizadores. Também confere proteção às camadas inferiores das ações do clima contribuindo para a resistência global da estrutura.

- Camada de ligação ou de regularização – a sua função é receber as cargas derivadas do tráfego, uniformizando as tensões e transmiti-las para a camada de base.
- Camada de base – Constitui suporte regular e resistente para as camadas posteriores, repartindo os esforços verticais devidos às cargas, com o intuito de diminuir as tensões sobre o solo de fundação.
- Camada de sub-base – possui funções idênticas às da camada de base, traduzindo-se na transição entre a base e a fundação. As principais funções consistem na receção dos esforços provenientes da camada de base e repartindo-os para a fundação, e é também capaz de drenar as infiltrações que poderão acontecer nas camadas superiores e impedir que a água capilar suba protegendo as camadas do pavimento. Os materiais geralmente utilizados possuem características inferiores às dos materiais da camada de base, uma vez que os esforços a que se encontra sujeita são mais reduzidos.
- Fundação – forma-se através da utilização do leito do pavimento. A sua finalidade trata-se da estabilização mecânica superficial e da homogeneização das características mecânicas.

Os esforços presentes nas diversas camadas do pavimento conduzem a dois estados últimos de ruína, isto é, o fendilhamento das camadas betuminosas e a deformação permanente das camadas existentes.

2.3. Degradação de pavimentos

Após a conclusão da sua construção, os pavimentos rodoviários são sujeitos a diversas ações que se traduzem numa perda da sua qualidade inicial, as quais assumem um papel significativo na sua degradação. Em momentos anteriores à abertura ao trânsito, um pavimento rodoviário já se encontra sujeito às ações dos agentes atmosféricos provocando solicitações a este, que podem ser severas dependendo da constituição e localização do pavimento.

Perante materiais betuminosos, o comportamento da camada de desgaste dos pavimentos deve-se sobretudo ao envelhecimento do ligante, por ação da luz solar e das variações da temperatura.

Através da ação da luz solar, surge um aumento da viscosidade do betume, o que fornece um aumento da rigidez e a consequente fragilidade da mistura betuminosa.

Uma vez que pode estar-se perante temperaturas altas e baixas, estas fornecem diferentes comportamentos à mistura betuminosa. Com a presença de temperaturas altas, é possível

verificar uma redução da viscosidade do ligante, causando uma redução da rigidez da mistura, tornando-a assim mais suscetível ao aparecimento de deformações plásticas. Por outro lado, diante de temperaturas baixas, a rigidez aumenta, o que permite suportar mais carga, mas poderão formar-se fendas de retração, pois a mistura fica mais frágil.

A ação da água faz com que exista uma diminuição no atrito interno dos materiais granulares, o que permite o arranjo das partículas, quando sujeitos à ação das cargas. A contribuição da água poderá ser um fator importante, dependendo da sensibilidade à água das camadas granulares e do solo de fundação.

Outro aspeto que deve ser realçado quando se fala em degradações está relacionado com os efeitos dos produtos químicos, principalmente provenientes dos combustíveis dos veículos, que faz com que possa existir uma desagregação da camada de desgaste.

Os pavimentos flexíveis em serviço, com o passar do tempo, estão sujeitos ao aparecimento de degradações, as quais fazem com que o pavimento tenha uma diminuição na sua qualidade estrutural e funcional. As degradações que surgem são devidas às ações do tráfego e às condições climáticas inerentes no local, as quais quando atuam sobre um pavimento com características geométricas e mecânicas específicas transmitem movimentos ao pavimento que faz com que as suas propriedades iniciais sejam alteradas.

Geralmente, o processo de acontecimento dos factos deve-se à desagregação da camada de desgaste, surgindo fendas no pavimento, que permitem o movimento dos materiais presentes na constituição do pavimento, e que depois originam deformações.

As degradações para pavimentos flexíveis podem ser divididas em cinco famílias. No Quadro 2.2 é possível observar a distribuição das famílias e o tipo de degradações relativo a cada família.

Quadro 2.2 - Famílias e tipos de degradações (Oliveira, 2013)

Famílias de degradações	Tipos de degradações
Deformações	- Abatimento - Longitudinal - Berma - Eixo - Transversal - Deformações localizadas - Ondulação - Rodeiras - grande raio (camadas inferiores) - pequeno raio (camadas superiores)
Fendilhamento	- Fendas - Fadiga - Longitudinais - Eixo - Berma - Transversais - Parabólicas - Pele de crocodilo - malha fina (≤ 40 cm) - malha larga (> 40 cm)
Desagregação da camada de desgaste	- Desagregação superficial - Cabeça de gato - Pelada - Ninhos (covas) - Polimento dos agregados
Movimento de materiais	- Exsudação do betume - Subida de finos - Escorregamento entre camadas
Reparações	- Deformações - Fendilhamento

Embora existam vários tipos de famílias de degradações, as mais importantes estão relacionadas com o aparecimento de deformações permanentes e o desenvolvimento de fendilhamento nas camadas betuminosas.

As deformações permanentes mais relevantes passam pelo aparecimento de cavados de rodeiras na zona de tráfego, tal como se pode observar na Figura 2.5. O aparecimento destas deformações deve-se à insuficiente capacidade de suporte do solo de fundação, às más condições de drenagem e à deficiente compactação das camadas estruturais do pavimento. Este fenómeno, como salientado no Quadro 2.2, pode assumir duas configurações: rodeiras de pequeno raio e rodeiras de grande raio, e estas causam irregularidade transversal e permitem que a água se acumule na superfície.



Figura 2.5 – Rodeira de grande raio (Oliveira, 2013)

Quanto ao fendilhamento, apresenta-se como uma das principais causas de degradação, acontecendo frequentemente devido ao excesso de tensões de tração.

O grupo mais importante acaba por ser o fendilhamento constituído pela pele de crocodilo, que resulta do desenvolvimento de uma ou várias fendas ramificadas. Quando se está na presença de uma fenda ramificada com um estado já avançado, a probabilidade de penetração de água é muito maior, o que se traduz num enfraquecimento das camadas inferiores. Um desprendimento de blocos e formação de ninhos também poderão ser consequências prováveis de acontecer.

Na Figura 2.6 é possível observar o fendilhamento do tipo pele de crocodilo aberta, de malha fina.



Figura 2.6 - Fendilhamento do tipo pele de crocodilo (Oliveira, 2013)

2.4. Reabilitação de pavimentos rodoviários

Nos dias atuais existe um conceito racional de conservação e de reabilitação, nomeadamente a aplicação da “estratégia dos 3 C’s”, que consiste no tratamento certo, na estrada certa, no tempo

certo (FP2, 2001). No que diz respeito ao significado literal das duas palavras, conservação pretende manter o estado atual, enquanto que reabilitação significa recuperar o estado inicial. No entanto, é usual referir-se o termo conservação para ambos os trabalhos, sem fazer a separação dos termos.

Devido à necessidade de preservar as infraestruturas existentes na rede rodoviária é necessária uma informação constantemente atualizada através de um diagnóstico prévio das causas das degradações atuais ou que possam vir a surgir, e também um conhecimento sobre todos os elementos atuantes durante o período de vida de um pavimento, tais como as características dos materiais, ações de tráfego e clima e de outros parâmetros da estrada, tornando possível caracterizar o estado da rede e posteriormente criar estratégias de conservação/reabilitação (Azevedo, 1999).

Como relatado anteriormente, o pavimento é o elemento que está sujeito às ações mais significativas, especialmente ações do tráfego e clima, e para que este possa manter um nível de serviço adequado, hoje em dia, os principais recursos financeiros utilizados são para a sua construção, conservação e reabilitação.

Para que o desenvolvimento de diferentes estratégias de conservação possa decorrer de forma exemplar, é de extrema importância possuir um conhecimento de cada técnica de conservação que possa vir a ser utilizada nos mais diversos trabalhos. Com isto é possível evidenciar duas técnicas de reabilitações de pavimentos:

- Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais;
- Técnicas de Reabilitação das Características Estruturais.

2.4.1 Técnicas de reabilitação das características superficiais

As técnicas de reabilitação das características superficiais dos pavimentos rodoviários são aplicadas ao nível da camada de desgaste, apenas para pavimentos que possuem boas condições estruturais, com o intuito de devolver aos pavimentos as suas características funcionais iniciais.

Com a aplicação de novas camadas pretende-se reabilitar certas características funcionais que foram perdidas com o passar do tempo, tais como:

- Rugosidade, tornando-se numa melhoria na segurança de circulação;
- Regularidade longitudinal e transversal, transmitindo conforto e segurança aos utentes;

- Impermeabilidade da camada de desgaste;
- Redução de ruído, nomeadamente em zonas urbanas de grande afluente de circulação automóvel;
- Diminuição da projeção de água através da aplicação de uma camada drenante, permitindo que a água possa escoar.

As etapas a proceder para a reabilitação das características superficiais consistem na elaboração de um diagnóstico do pavimento que se pretende reabilitar, construir uma matriz que relaciona a patologia à técnica de conservação e por fim escolher a técnica mais adequada para as condições do pavimento e para a estratégia de conservação adotada.

Existem diversos tipos de tratamentos superficiais que estão dependentes de fatores tais como as características do pavimento, volume e tipo de tráfego e das condições climáticas que atuam no local. Nos seguintes pontos, descrevem-se as constituições dos vários tipos de revestimentos superficiais e a sua aplicação (Branco et al, 2011).

- **(1) Revestimento simples (LA)** – Camada de revestimento do pavimento por colocação de ligante betuminoso coberto por uma camada de agregado granular de pequenas dimensões. Trata-se da estrutura mais económica em comparação com os outros tipos de revestimentos superficiais. Uma vez que este tipo de revestimentos não resiste a esforços tangenciais elevados é usual serem aplicados a estradas com um TMDA até 300 veículos.
- **(2) Revestimento simples com dupla aplicação de agregado (LAa)** – Técnica de revestimento adaptável a situações em que o tráfego existente é elevado e rápido, uma vez que fornece ao pavimento boa aderência e permite um rápido escoamento das águas na zona superficial do pavimento.
- **(3) Revestimento simples com aplicação prévia de agregado (ALa)** – trata-se de um revestimento adaptado a suportes heterogéneos e com exsudação, no entanto proporciona uma impermeabilização baixa, o que faz com que seja uma técnica poucas vezes utilizada.
- **(4) Revestimento duplo (LALa)** – técnica em que são aplicadas duas camadas de ligante betuminoso cobertas com agregado granular. Consegue-se um melhoramento da rugosidade, concede aos agregados a possibilidade de se ajustarem com facilidade e

permitem uma boa impermeabilização. Esta técnica de revestimento é oportuna para pavimentos com tráfego bastante elevado e rápido.

- **(5) Revestimento duplo com aplicação prévia de agregados (ALALa)** – é aplicado com o mesmo processo do revestimento simples com dupla aplicação de agregado, mas para suportes ainda mais heterogêneos.
- **(6) Revestimento triplo (LALALa)** – aplicável a pavimentos com suportes muito heterogêneos, mas devido aos custos de aplicação bastante elevados torna-se numa técnica pouco aplicável.

Na Figura 2.7 é possível observar a constituição dos vários tipos de revestimentos betuminosos superficiais relatados anteriormente.

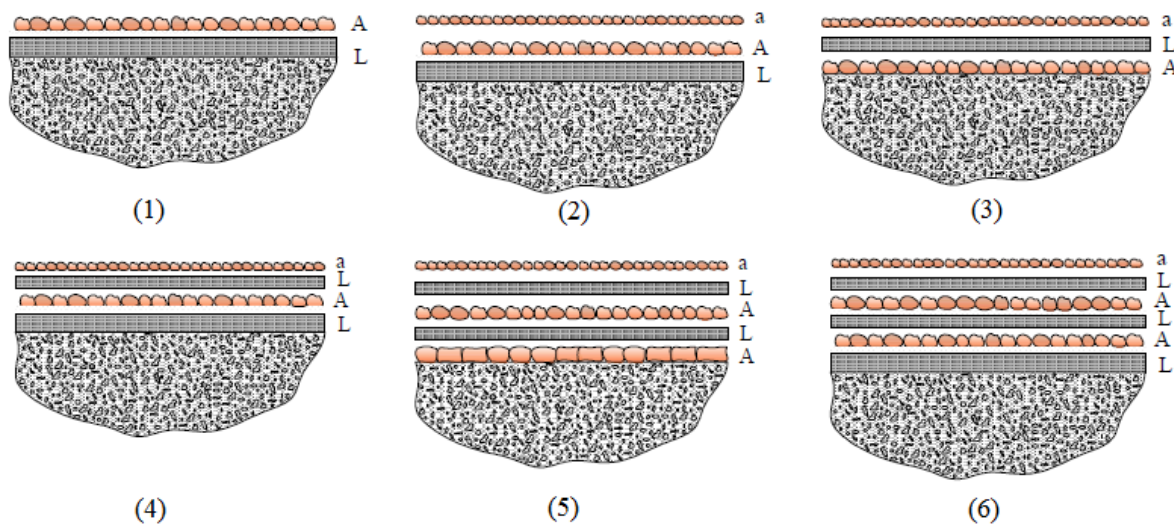


Figura 2.7 - Diversos tipos de revestimentos betuminosos superficiais (Vicente, 2006)

Através da aplicação de revestimentos superficiais em pavimentos rodoviários é possível destacar as seguintes vantagens:

- Tarefa simples e segura no que diz respeito ao stock, transporte e sua aplicação;
- Torna-se possível o trabalho mesmo quando se verificam temperaturas ambientes baixas;
- Uma menor suscetibilidade térmica;
- Fácil penetração e envolvimento do ligante com os agregados;
- Possibilidade de aplicação uniforme de pequenas percentagens de ligante;
- Aquando da aplicação não se corre o risco de um sobreaquecimento do ligante que possa resultar num envelhecimento precoce deste;

- A falta de emissão de gases ou vapores faz com que não seja prejudicial à saúde.

A técnica de microaglomerado betuminoso a frio consiste na aplicação de uma mistura betuminosa a frio com emulsão betuminosa, normalmente modificada, realizada diretamente sobre o pavimento com equipamento adequado e espalhada sobre o pavimento, num estado fluido, antes da rotura da emulsão, com espessura média de 1 cm, e que permite que a circulação possa ser retomada sem a necessidade de efetuar compactação da camada.

Trata-se duma técnica adotada em especial em locais urbanos de tráfego não muito elevado e que proporciona boas características de aderência dos pneus, de rugosidade superficial, origina baixo ruído em circulação e essencialmente melhora os níveis de impermeabilização. Poderá ser também usada na selagem de juntas longitudinais e reparações na camada de desgaste de um pavimento, devido à sua reduzida espessura.

Com aplicação da técnica de microaglomerado betuminoso a frio é possível verificar uma poupança energética e os custos de aplicação são também satisfatórios.

Outra técnica existente é a aplicação de lama asfáltica (Slurry Seal) que se trata de uma mistura betuminosa equivalente ao microaglomerado betuminoso a frio, tendo apenas um fator diferenciado que é o uso de agregados de menor dimensão, nomeadamente agregados inferiores a 2 mm, o que confere à mistura um aspeto semelhante a um mastique betuminoso ou a uma lama asfáltica.

Trata-se de uma técnica ainda aplicada em Portugal para efeitos de reabilitação para adiar intervenções de fundo, e também em casos recorrentes no tratamento prévio de pavimentos fendilhados. A principal vantagem no uso desta técnica deve-se à sua facilidade de espalhamento e ao grande rendimento que proporciona. No entanto, a sua reduzida macro e micro-rugosidade assume-se como uma desvantagem, pois com isso faz com que a sua aderência em pavimento molhado seja reduzida.

O microbetão betuminoso rugoso aplica-se no uso de camadas com espessuras entre os 2,5 a 3,5 cm, utilizando uma granulometria descontínua 0/10, com frações 0/2 e 6/10 e aplicado em pavimentos de reduzida deformabilidade, nomeadamente zonas urbanas. É utilizado um ligante modificado com polímeros, geralmente elastómeros.

O processo de aplicação da camada de microbetão betuminoso rugoso passa pela limpeza do pavimento existente e em seguida é aplicada uma rega de colagem com uma emulsão betuminosa, com uma taxa de betume residual de 350 a 400 g/m². A aplicação deve ser feita com um espalhamento transversal uniforme e o aquecimento do ligante deve ser indireto até temperaturas de 60 °C. Após a aplicação da emulsão a circulação do tráfego de obra está interdita.

Quanto ao seu fabrico, este é efetuado em central do tipo descontínua, ou do tipo contínuo. No entanto, a central do tipo contínuo deve possuir controlo ponderal da dosagem de finos em báscula individual. Devido à elevada viscosidade do betume modificado, a temperatura de fabrico deve exceder cerca de 20 °C relativamente às misturas tradicionais, isto é, entre 160 e 180 °C, sem ultrapassar os 190 °C, pois pode fazer com que os polímeros se degradem e que o betume oxide.

O transporte deste tipo de misturas betuminosas deve ser o mais reduzido possível, de modo que se evite a segregação do material, o escorrimento do betume modificado e que a mistura tenha um défice na temperatura.

O espalhamento da mistura deve ser realizado em dias que se verifique uma temperatura ambiente superior a 10 °C, sem indícios de chuva e com velocidades de vento reduzidas. Para o processo de compactação da mistura, recomenda-se que esta possua temperaturas a rondar os 140 e 160 °C, e é realizada através de cilindros de rasto liso estáticos molhados, de 10 a 12 tf, de modo a que o ligante betuminoso não possa ficar colado aos rolos.

Torna-se também importante realçar o betão betuminoso drenante, o qual se trata de uma mistura betuminosa com agregados de granulometria descontínua, com elevada porosidade, sendo utilizados betumes modificados na sua produção.

Este tipo de mistura apresenta uma percentagem elevada de vazios, o que permite que a água que caia no pavimento possa infiltrar-se nestes vazios, fazendo com que a projeção de água seja reduzida, eliminando o fenómeno de hidroplanagem, diminuindo as derrapagens e confere bons níveis de segurança para os utentes da estrada.

O processo construtivo do betão betuminoso drenante assemelha-se à construção de um microbetão betuminoso rugoso, devido à utilização de ligantes com polímeros de ambas as partes.

O uso de betão betuminoso drenante deverá ser aplicado em situações nas quais se verifique que o suporte tenha boa capacidade de suporte, boa regularidade e que seja impermeável. Esta técnica revela boas características mecânicas, resiste um tempo considerável à degradação, e a sua aplicação é oportuna em estradas de tráfego elevado e rápido ou em vias urbanas periféricas. Uma vez que também é possível apurar níveis reduzidos de ruído, poderá ser aplicada em zonas urbanas onde se pretende que a propagação de ruído seja baixa.

2.4.2 Técnicas de reabilitação das características estruturais

As técnicas de reabilitação das características estruturais baseiam-se na aplicação de novas camadas betuminosas, antecedidas de operações de pré-regularização, com o objetivo de reforçar o pavimento existente, permitindo que a capacidade estrutural do pavimento aumente e se encontre em condições, de modo que possa suportar as cargas aplicadas pelos veículos.

Quando se pretende reforçar um pavimento é necessário realizar um estudo prévio sobre o nível de fendilhamento existente à superfície do pavimento. Quando este representa um baixo nível de fendilhamento, a percentagem de fendilhamento da superfície ronda os 10% na zona de passagem dos rodados. Para percentagem de fendilhamento superiores a 10% considera-se um alto nível de fendilhamento (Pais, 1999).

Se não se proceder à realização do reforço do pavimento quando este ainda apresenta um nível baixo de fendilhamento, a área de fendilhamento da superfície do pavimento transita de um valor reduzido para um valor que se torna difícil a aplicação de uma estratégia de reforço do pavimento (Pais, 1999).

Geralmente, as misturas utilizadas nas camadas de reforço estão dependentes do tipo e critério de dimensionamento adotado, podendo ser aplicadas numa única camada assumindo o papel de camada de desgaste, ou dividida em camada de base, camada de regularização e camada de desgaste. Assim, podem-se enunciar as seguintes misturas betuminosas utilizadas no reforço de pavimentos flexíveis: macadame betuminoso, mistura betuminosa densa e betão betuminoso de alto módulo.

O macadame betuminoso e a mistura betuminosa densa são usados como camada de base, mas também como camada de regularização, uma vez que é possível o melhoramento de

características estruturais e a preparação da superfície para posterior colocação de uma camada de desgaste.

O betão betuminoso de alto módulo utiliza betumes mais duros no seu fabrico e destina-se a camadas de base e regularização. Uma vez que os betumes utilizados são mais duros, ao ser comparado com as misturas convencionais, o betão betuminoso de alto módulo apresenta uma elevada resistência à deformação permanente e à fadiga, assumindo-se um reforço mais durável embora utilize espessuras mais reduzidas.

Através da análise da Figura 2.8 é possível verificar quais as técnicas que podem ser usadas dependendo do nível de fendilhamento do pavimento existente.

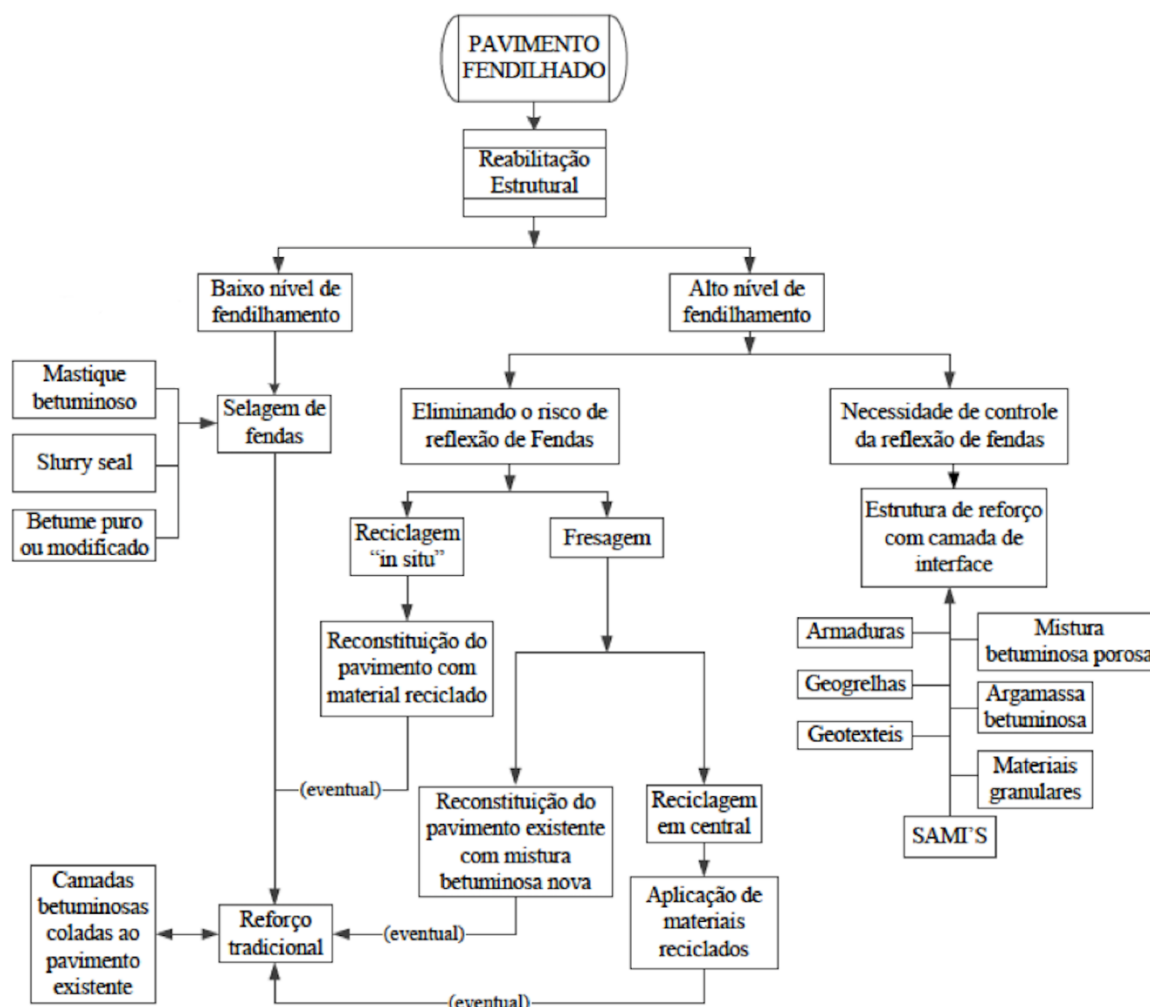


Figura 2.8 - Estratégias normalmente adotadas na reabilitação estrutural de pavimentos fendilhados (Minhoto, 2005)

Para baixos níveis de fendilhamento ao utilizar técnicas de selagem, como por exemplo: emulsão betuminosa, mastique betuminoso, slurry seal e betume puro ou modificado, é possível retardar a necessidade um reforço tradicional do pavimento.

Em contrapartida, para níveis de fendilhamento altos, já existem mais opções a aplicar para a reabilitação estrutural do pavimento. No entanto, a técnica usual prende-se à realização de uma fresagem do pavimento existente até uma certa profundidade, eliminando o risco de reflexão de fendas.

Outra técnica que permite a eliminação do risco de reflexão de fendas é a reciclagem de pavimentos ou regeneração da camada fendilhada, através da utilização de material fresado e adicionando novos materiais, para construção de novas camadas de misturas betuminosas.

Relativamente à reciclagem de pavimentos é possível realçar a aplicação de misturas modificadas com borracha resultante da reciclagem de pneus usados, de dimensão milimétrica. O uso desta técnica revelou-se capaz de dissipar tensões de tração oriundas por reflexão de fendas num ambiente de variações térmicas, de se verificar redução da suscetibilidade térmica do ligante, e também é possível obter ganhos de flexibilidade a baixas temperaturas sem perda de resistência às deformações permanentes quando são aplicadas altas temperaturas no pavimento (Epps, 1997).

Com o uso desta técnica também é possível realçar as seguintes vantagens:

- Melhoramento na resistência à fadiga;
- Através da utilização de pneus usados obtém-se uma redução no impacte ambiental oriundo do depósito de pneus e da sua incineração;
- Camada de pavimento com espessura reduzida, em comparação com as misturas tradicionais, e através disso uma possível redução na quantidade de agregados utilizados.

Como técnicas de realização de interfaces anti-propagação de fendas utilizadas na reabilitação de pavimentos podem-se enunciar as seguintes (Branco et al, 2011):

- Grelhas: em que o material utilizado é em forma de rede quadrada ou retangular e pode ser constituído por vários materiais, nomeadamente por polipropileno, polietileno, poliéster ou fibra de vidro;

- Armaduras: quando o nível de fendilhamento é alto utiliza-se este tipo de material, constituído por malhas de aço ou ferro galvanizado;
- Argamassas betuminosas: trata-se de uma mistura betuminosa de granulometria 0/6, aplicada com espessuras de 2 cm e em que o ligante utilizado pode ser um betume mole ou modificado com elastómeros;
- SAMI's (Stress Absorbing Membrane Interlayer): camadas com capacidade de absorção de tensões resultantes do movimento das fendas existentes, formadas por elevadas quantidades de betume modificado com agregado de pequenas dimensões;
- Geotêxteis impregnados: consiste na aplicação de uma manta geotêxtil de polipropileno ou poliéster, impregnada com betume puro ou modificado, sobreposta sobre uma rega de emulsão betuminosa. A sua colocação deve ser realizada de forma cuidada, de modo que se evite dobras, rugas ou ondulações. Em zonas de traçados sinuosos não é aconselhável;

Nos últimos tempos, vários estudos foram realizados, nomeadamente por Liu et al. (2010), Little e Bhasin (2007) e Daniel e Kim (2001), os quais apontam para o uso de radiação de micro-ondas como forma de reparação de degradações em pavimentos rodoviários. O uso desta técnica revela-se mais simples que as já existentes no que diz respeito à eliminação de fendas, uma vez que se trata de um trabalho in situ e de rápida execução. Ao serem aplicadas micro-ondas no pavimento, são conferidas novas propriedades ao pavimento, fazendo que seja possível um novo arranjo das partículas, quando se procede à compactação do pavimento.

2.5. Misturas betuminosas

Na construção ou reabilitação de um pavimento, as camadas superiores são constituídas por misturas betuminosas ou misturas com ligantes hidráulicos. No entanto, as misturas betuminosas assumem mais relevância em quase todo o mundo.

Uma mistura betuminosa é composta por materiais granulares misturados com uma certa quantidade de ligante. Depois de se proceder à mistura em centrais adequadas, a mistura é transportada para o local que se pretende, espalhada e compactada. Após a realização destes trabalhos, obtém-se uma camada de pavimento, a qual permite a circulação dos veículos de forma segura e cómoda durante a vida útil do pavimento.

O termo mistura betuminosa a quente aplica-se maioritariamente a misturas betuminosas utilizadas em obras de pavimentação, desde as argamassas betuminosas, produzidas com agregados finos, fíler e betume, até os macadames betuminosos, em que os elementos que assumem um valor mais significativo no comportamento da mistura são os agregados grossos.

Para cada camada de pavimento existem vários tipos de misturas betuminosas que podem ser aplicadas. De acordo com a norma NP EN 13108-1 (2011), que especifica os requisitos necessários para a produção de misturas betuminosas a quente do grupo do betão betuminoso, e também de acordo com o caderno de encargos tipo obra – Estradas de Portugal (CE EP, 2014), as misturas betuminosas podem ser designadas segundo o Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Designação das Misturas Betuminosas (CE EP, 2014)

Camada	Designação anterior	Designação actual
Base	Macadame Betuminoso Fuso B	AC 32 base ligante (MB)
	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 base ligante (MB)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 20 base ligante (MBAM)
Ligação	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 bin ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 bin ligante (MBD)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 16 bin ligante (MBAM)
	Betão Betuminoso	AC 14 bin ligante (BB)
	Argamassa Betuminosa com betume modificado	AC 4 bin ligante (AB)
Regularização	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 reg ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 reg ligante (MBD)
	Betão Betuminoso	AC 14 reg ligante (BB)
	Argamassa Betuminosa com betume modificado	AC 4 reg ligante (AB)
Desgaste	Betão Betuminoso	AC 14 surf ligante (BB)
	Betão Betuminoso Rugoso	AC 14 surf ligante (BBr)
	(micro) Betão Betuminoso Rugoso	AC 10 surf ligante (mBBr)
AC – designação do produto, cujo termo em inglês é “Asphalt Concrete”; ligante – classe a definir; base – referente à camada de base, cujo termo em inglês é similar “base course”; bin – referente à camada de ligação, cujo termo em inglês é “binder course”, de espessura constante reg – referente à camada de regularização, cujo termo em inglês é “regulating course”, de espessura variável; surf – referente à camada de desgaste, cujo termo em inglês é “surface course”.		

Para as camadas de pavimentos rodoviários, as misturas betuminosas devem possuir as seguintes características: estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga,

aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade (Asphalt Institute, 1983). De seguida apresentam-se alguns aspetos a considerar para cada fator mencionado:

- Estabilidade

A estabilidade consiste em ter uma mistura que seja capaz de resistir às cargas que irão surgir durante a sua vida útil. Esta propriedade prende-se ao atrito interno dos materiais e à sua coesão. O atrito interno depende da textura dos materiais, da granulometria dos agregados, da forma das partículas, da densidade da mistura e da quantidade e tipo de betume. A coesão resulta da introdução de betume na produção das misturas, permitindo que as partículas de agregado se possam ligar de forma adequada.

- Durabilidade

Pretende-se que as misturas betuminosas sejam resistentes à desagregação (devido às solicitações climáticas e ações do tráfego) e ao envelhecimento (resistência ao fendilhamento a baixas temperaturas). Quanto maior for a quantidade de betume utilizada, maior será a durabilidade da mistura betuminosa. O uso de materiais de granulometria contínua, bem compactados, utilizados em misturas impermeáveis, resultará num melhoramento na durabilidade da mistura.

- Flexibilidade

A flexibilidade permite que o pavimento possa conseguir adaptar-se de forma gradual aos movimentos do seu suporte. A flexibilidade aumenta com o aumento da percentagem de betume utilizada, permitindo melhorar também a utilização de agregados de granulometria relativamente aberta.

- Resistência à fadiga

A fadiga nos pavimentos deve-se às passagens repetidas dos veículos, fazendo com que existam extensões de tração nos materiais ligados. As extensões podem ser reversíveis ou irreversíveis. Embora os pavimentos consigam suportar as cargas a que estão sujeitos, a acumulação excessiva das mesmas pode levar à abertura de fendas.

- Aderência

A aderência é um dos fatores mais relevantes para que um pavimento possa oferecer segurança aos seus utilizadores, nomeadamente em tempos de chuva. Para que um pavimento tenha boa rugosidade, não deve ser utilizado betume em excesso na produção da mistura, pois irá traduzir-se numa superfície demasiado lisa, o que fará com que o atrito pneu-pavimento seja reduzido. Deve-se também escolher agregados com textura superficial rugosa, com boa resistência ao desgaste, de forma a manter a boa rugosidade do pavimento.

- Impermeabilidade

É necessário que uma mistura betuminosa seja impermeável para que não permita a passagem de água para as camadas inferiores, nomeadamente para as camadas granulares e solo de fundação o que faz com que a capacidade de suporte do pavimento seja reduzida. Além disto, a água dentro de uma mistura betuminosa, aquando da passagem do tráfego, faz aumentar as pressões neutras e assim desagregar a mistura levando à ruína do pavimento. Numa mistura betuminosa compactada, a quantidade de vazios existente revela-se numa boa indicação da impermeabilidade.

- Trabalhabilidade

Espera-se que uma mistura contenha boa trabalhabilidade tornando a sua aplicação e compactação facilitada. No entanto, por vezes, a procura de maior estabilidade revela-se difícil no que diz respeito à trabalhabilidade da mistura betuminosa.

De seguida enunciam-se os vários tipos de misturas betuminosas fabricadas a quente, mencionando-se as propriedades que os agregados devem possuir, e também os passos que o material fabricado deve seguir no fabrico deste tipo de misturas.

Os principais tipos de misturas betuminosas fabricadas a quente existentes no mercado são as mencionadas nos seguintes pontos (Branco et al., 2011):

- Macadame por penetração e por semi-penetração;
- Macadame betuminoso;
- Mistura betuminosa densa;
- Mistura de alto módulo de deformabilidade;
- Betão betuminoso;
- Betão betuminoso rugoso;

- Argamassa betuminosa.

De seguida apresentam-se as principais propriedades de cada mistura enunciada anteriormente.

- Macadame por penetração e por semi-penetração;

Este tipo de misturas é utilizado em camadas de base e de regularização de estradas em que o nível de tráfego é relativamente baixo e em obras municipais.

Para pavimentos com misturas deste tipo é preparada uma camada granular com agregado do tipo 20/40 mm ou 40/60 mm, onde irá ser aplicada uma rega de betume a quente do tipo 160/220, que penetra na camada granular por gravidade. Como alternativa ao betume 160/220 poderá ser usada uma emulsão betuminosa catiónica de rotura rápida ou média, dependendo das condições climáticas no local da obra.

Para conferir ao pavimento um aspeto mais homogéneo, aplica-se um agregado de recobrimento, geralmente de granulometria 4/10 mm ou 4/14 mm, permitindo tapar os vazios superficiais existentes.

A diferença entre macadame por penetração ou semi-penetração deve-se ao facto de o betume ser capaz ou não de cobrir toda a espessura da camada granular.

- Macadame betuminoso

Trata-se de uma mistura em que são utilizados agregados com uma granulometria extensa, com dimensões máximas de 37,5 mm ou 25 mm. O macadame betuminoso é aplicado em camadas de base ou regularização, com espessuras superiores a 8 cm.

Na sua preparação, a percentagem de finos varia entre os 2 e 8%, a percentagem em betume assume valores de 4 a 4,5%, e a porosidade assume valores de 4 a 8%.

Devido ao facto de serem empregues agregados de grandes dimensões, não é aconselhável aplicar o método de Marshall para a formulação da mistura. No entanto, em laboratório, utiliza-se um processo em que se fabricam provetes compactados com um pilão vibrador, no molde de compactação grande. Após a análise do trecho experimental, se for necessário, é possível proceder a pequenos ajustes na composição da mistura.

- Mistura betuminosa densa

Uma mistura betuminosa densa é utilizada em camadas de regularização, e é constituída por um agregado de granulometria do tipo 0/20 mm. Relativamente à constituição da mistura, o teor em betume assume valores superiores a 5%, a porosidade varia entre 3 e 5% e os vazios da mistura de agregados (VMA) não deve possuir valores inferiores a 13%.

Aconselha-se o uso desta mistura para estradas em que os tráfegos sejam leves e estradas da rede secundária.

- Mistura de alto módulo de deformabilidade

Uma mistura de alto módulo de deformabilidade trata-se de uma mistura que pode ser aplicada em camadas de base, regularização e desgaste.

Devido ao uso de um betume duro, normalmente um 10/20, e com percentagens superiores a 5%. Devido às características do betume é possível obter elevados pontos de amolecimento anel e bola, ao se atingirem temperaturas entre 60°C e 90°C.

Relativamente à produção da mistura, geralmente utiliza-se agregados do tipo 0/10, 0/14 e 0/20. A mistura é realizada com temperaturas entre 160°C e 180°C. Em obra registam-se temperaturas de 145°C a 160°C para o espalhamento e 140°C para a compactação.

Este tipo de mistura apresenta maior resistência à fadiga e, uma vez que se trata de uma mistura mais rígida, consegue degradar de forma mais eficaz as cargas a que o pavimento está sujeito. Revela também um bom comportamento relativo às deformações permanentes.

Quando utilizada como camada de base, pretende-se que possua as seguintes propriedades: porosidade entre 2 e 6%, uma percentagem mínima de betume de 5,3% e um valor de VMA mínimo de 13%.

- Betão betuminoso

O betão betuminoso é indicado para a realização de camadas de desgaste. No entanto, uma vez que se trata de uma mistura mais fechada e resistente, poderá também ser aplicada em camadas de regularização.

Esta mistura contém agregados do tipo 0/10 ou 0/14 mm. As principais características da mistura são uma percentagem de betume entre 5 e 6%, porosidade com valores entre 3 e 6% e vazios da mistura de agregados (VMA) inferior a 14%.

- Betão betuminoso drenante

Esta mistura implementada como camada de desgaste, trata-se de uma mistura betuminosa aberta com aproximadamente 4 cm de espessura. Devido ao uso de uma granulometria descontínua do tipo 0/14 mm permite que a drenagem da água se proceda no interior da camada superficial até às bermas ao contrário das misturas habituais, em que a drenagem acontece na superfície do pavimento. Este fator faz com que a projeção de água seja reduzida ou eliminada, proporcionando uma melhor visibilidade aos condutores em tempos de chuva, assim como o risco de hidroplanagem.

Em locais onde é possível verificar ocorrência de tempos de chuva significativos, o uso deste tipo de misturas revela-se muito eficaz. Um exemplo da elevada utilização de betão betuminoso drenante devido ao clima é na Holanda, uma vez que as chuvas são frequentes.

O betume utilizado para a preparação deste tipo de mistura é geralmente um betume modificado com polímeros adequados, em que se torna possível obter uma maior resistência ao envelhecimento e à elasticidade, menor suscetibilidade térmica e uma maior viscosidade verificada a altas temperaturas.

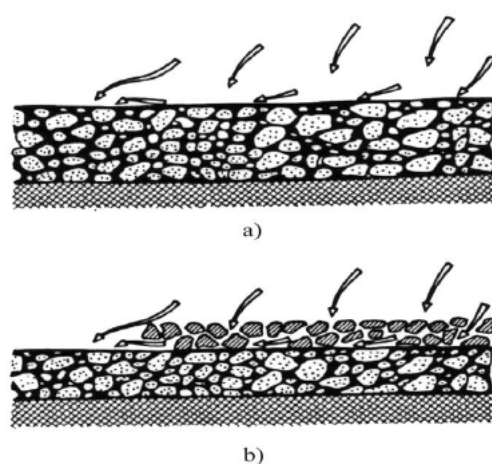


Figura 2.9 – a) mistura tradicional; b) mistura porosa (Kraemer et al., 1996)

As propriedades significativas relativamente a esta mistura são as seguintes: porosidade a rondar entre 22 e 30% e uma percentagem mínima de betume modificado de 4%.

Outros aspetos a relatar é o facto deste tipo de mistura permitir obter redução no ruído oriundo do rolamento dos pneus dos veículos. Consegue-se verificar reduções de 3 a 4 dB(A) em condições secas e de 7 a 8 dB(A) quando o pavimento é atingido por chuvadas. O ruído emitido pelos motores dos veículos também é absorvido de uma forma mais significativa com aplicação deste tipo de mistura em camadas de desgaste.

No entanto também se torna possível apontar alguns inconvenientes ao uso deste tipo de mistura, como por exemplo a fraca contribuição estrutural, o facto de uma maior porosidade permitir uma maior exposição aos agentes climáticos o que irá fazer com que o betume obtenha um envelhecimento precoce.

- Micro-betão betuminoso rugoso

O micro-betão betuminoso rugoso é aplicável em camadas de desgaste com espessura reduzida com valores a variar entre 2,5 e 3,5 cm. Devido ao facto de ser uma mistura delgada poderá ser aplicada como tratamentos superficiais, uma vez que com esta espessura não possui capacidade para ajudar na resistência estrutural do pavimento.

A mistura contém agregados a partir das frações 0/2 e 6/10, o que leva a possuir uma granulometria 0/10 com descontinuidade na fração 2/6.

A composição deste tipo de mistura consiste numa porosidade entre 3 e 6% e uma percentagem mínima de betume modificado de 5%.

- Argamassa betuminosa

Este tipo de mistura betuminosa a quente pode ser usado como camada de regularização, quando se tenciona ter espessuras entre 2 e 4 cm, e como camada de desgaste para pavimentos onde o tráfego seja leve. Quando utilizada com um ligante modificado será possível a sua aplicação como camada retardadora do processo de propagação de fendas num pavimento que esteja a ser reabilitado.

As suas principais características são as seguintes: porosidade entre 5 e 7%, e um valor mínimo de vazios da mistura de agregados (VMA) de 15%.

De acordo com o (MACOPAV, JAE), a tipologia de misturas betuminosas a quente pode ser consultada no seguinte quadro.

Quadro 2.4 - Tipologia adotada para as misturas betuminosas fabricadas a quente
(MACOPAV, JAE)

Símbolo	Designação	Principais características
MBB	macadame betuminoso em camada de base	dimensão máxima do agregado: 37,5 mm teor em betume: 4,0 a 4,8% porosidade: 6 a 9% espessura recomendável: 9 a 15 cm (min. 8 cm; max. 16 cm)
MBR	macadame betuminoso em camada de regularização	dimensão máxima do agregado: 25 mm teor em betume: 4,0 a 4,8% porosidade: 8 a 10% espessura recomendável: 8 a 12 cm
MBD	mistura betuminosa em camada de regularização	dimensão máxima do agregado: 16 mm teor em betume: 4,8 a 5,4% porosidade: 4 a 6% espessura recomendável: 5 a 8 cm
BD	betão betuminoso em camada de desgaste	dimensão máxima do agregado: 14 mm teor em betume: 5,2 a 5,8% porosidade: 3 a 5% espessura recomendável: 4 a 6 cm

3. AQUECIMENTO DE MISTURAS BETUMINOSAS COM MICRO-ONDAS

3.1. Micro-ondas

Hoje em dia existem grandes preocupações em todo o mundo devido ao elevado número de pessoas expostas na produção e reciclagem de materiais betuminosos, o que se traduz em graves impactos ambientais e elevados riscos de saúde para os humanos. A exposição aos vapores do betume revela-se um fator de risco, uma vez que estes gases são considerados potenciais agentes cancerígenos (Benedetto et al, 2013).

Na produção destes materiais é possível verificar grandes repercussões tendo em conta o consumo de energia de recursos não renováveis, mas também o impacto económico e financeiro. Uma vez que na Europa estima-se que sejam produzidos cerca de 20 milhões de toneladas de betume por ano, torna-se necessário ter em atenção estes aspetos, estabelecendo-se uma política de reciclagem em que seja possível a produção de agregados reciclados de alta qualidade, mantendo então os níveis de qualidade dos materiais, para que se possa continuar a evolução nas vias de comunicação (Benedetto et al, 2013).

O aparecimento da tecnologia de micro-ondas surgiu por Percy Spencer, quando por acidente, enquanto trabalhava com magnetrons para aparelhos de radar, deparou-se com o derretimento de uma barra de chocolate que se encontrava no seu bolso. Após isso, Percy resolveu testar o aquecimento em outros alimentos, nomeadamente pipocas e um ovo. Este último cozinhou do interior para o exterior, explodindo devido à pressão exercida (Site Consultado nº 2).

Em 1945, a empresa Raytheon onde trabalhava Percy, procedeu ao patenteamento do processo de cozinhar por micro-ondas. Dois anos mais tarde, resolveram construir o primeiro forno de micro-ondas comercial, o Radarange. Este equipamento tinha 1,70 m de altura e pesava 340 kg. O seu arrefecimento era a água e produzia 3000 watts, aproximadamente três vezes a quantidade de radiação produzida por fornos de micro-ondas nos dias de hoje (Site Consultado nº 2).

3.2. Aquecimento

A utilização da radiação de micro-ondas no aquecimento de materiais começa a ganhar relevância, uma vez que é possível obter as mesmas vantagens, mas com poupanças de energia e tempos de processamento mais curtos, quando comparado com o aquecimento convencional.

Algumas das vantagens com o uso desta técnica são referenciadas nos seguintes pontos (Benedetto et al, 2013):

- Não se verificam emissões de poluentes aéreos ou líquidos;
- É possível um aquecimento muito rápido dos materiais;
- O aquecimento é mais fácil de controlar e existe um isolamento das condições de risco;
- Os gradientes térmicos verificados são quase insignificantes;
- Existe um controlo rigoroso na aplicação automática do aquecimento;
- Verifica-se uma boa capacidade de penetração de micro-ondas o que permite o aquecimento volumétrico de amostras;
- Verifica-se uma ação direta sobre as ligações polares e entropia do material a ser aquecida.

No que diz respeito ao aquecimento por micro-ondas na produção de misturas betuminosas, ainda se trata de uma técnica em desenvolvimento. Resultados alcançados em estudos experimentais na Califórnia demonstraram que as microondas rapidamente penetram no pavimento, em comparação com outros aquecedores de superfície, como chama direta ou infravermelho. O aumento da temperatura dentro do pavimento aumenta de modo uniforme, sem pontos quentes. No entanto, as micro-ondas frequentemente penetram mais fundo do que o necessário (Terrel, 1987).

No entanto, vários estudos foram realizados por autores como (Liu et al. (2010), Little e Bhasin (2007) e Daniel e Kim (2001)) que apontam que temperaturas elevadas durante tempos de repouso de misturas betuminosas promovem a auto-cura das mesmas.

Um dos pioneiros na aplicação de micro-ondas com o objetivo de reparar estradas foi Jeppson (1981). Jeppson e a Microdry Corporation of San Ramon, na Califórnia, desenvolveram e construíram vários aquecedores de larga escala com o objetivo de demonstrar o conceito de

aquecimento através de micro-ondas. Nos momentos iniciais o projeto consistia no aquecimento de pavimento para reciclagem (Terrel e Al-Ohaly, 1987).

Nos anos seguintes, vários protótipos foram construídos, os quais revelaram bons resultados, nomeadamente para a reciclagem de pavimentos. Aliás, pode realçar-se duas principais tarefas no uso desta tecnologia (Benedetto et al, 2013):

- Aquecimento para manutenção de estradas, nomeadamente reparação de fendas;
- Aquecimento de pavimento recuperado, o qual revela níveis de poluição do ar menores e um envelhecimento tardio do betume.

O aquecimento por micro-ondas baseia-se na transferência de energia de um campo eletromagnético através da excitação dos dipolos moleculares no material em que estão a ser aplicadas as micro-ondas. Quando o campo elétrico é aplicado, as moléculas tendem a alinhar-se com o campo, e quando o campo elétrico é retirado, as moléculas voltam ao seu estado não alinhado, dissipando a energia absorvida em forma de calor (Benedetto et al, 2013).

A quantidade de calor produzida encontra-se dependente de três fatores: constante dielétrica, tamanho da molécula e da viscosidade. Contudo, a dissipação de energia, que conduz à produção de calor, também varia com a temperatura e com a frequência de micro-ondas empregue no aquecimento. Mesmo utilizando uma frequência ressonante com a frequência de relaxação dielétrica, muitas vezes, a produção de calor, para uma dada substância, é pequena, pois pode ocorrer baixa penetração das ondas eletromagnéticas no material. A penetração da radiação eletromagnética é inversamente proporcional à sua frequência (Barboza, 2001).

Um forno de micro-ondas, Figura 3.1, é composto principalmente pelos seguintes elementos: gerador de microondas (chamado magnetron), o guia de ondas, a cavidade do forno e o espalhador de ondas (Rosini et al, 2004).

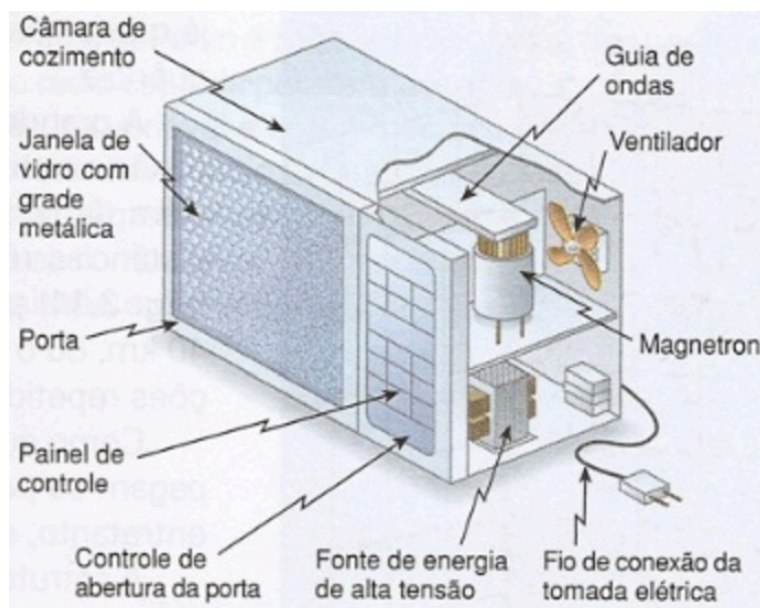


Figura 3.1 - Elementos de um forno micro-ondas (Site Consultado nº1)

A radiação produzida num forno de micro-ondas surge através do magnetron e depois é encaminhada para uma guia de ondas que de seguida as remete para a câmara de cozimento. O interior da câmara de cozimento é feito com paredes metálicas com o objetivo de refletir as micro-ondas constantemente, para que estas possam ficar no interior da câmara de cozimento até que sejam absorvidas pelo alimento ou objeto (Barboza et al, 2001).

Relativamente às ondas eletromagnéticas, provenientes da radiação micro-ondas, são semelhantes à rádio, luz visível e ondas raio-X, com frequências com valores entre 300 MHz e 300 GHz, as quais correspondem a comprimentos de onda entre 1 mm e 1m. As frequências que são mais vezes utilizadas são de 0,915 GHz e 2,45 GHz. No caso de uma frequência de 2,45 GHz o comprimento de onda aproxima-se de 120 mm (Benedetto et al, 2013) e (Gallego et al, 2013).

Embora não tenham ocorrido acidentes com o uso deste aparelho, existe um potencial risco de explosão devido ao facto de quando os compostos orgânicos são aquecidos, originam vapores em torno do equipamento elétrico.

Para se conseguir ter uma perceção do funcionamento das micro-ondas no interior do forno, Rosini et al (2004), realizaram um ensaio, aquecendo no micro-ondas marshmallows, como pode ser visto na Figura 3.2. O estudo decorreu com e sem o uso do prato giratório.

Posto isto, foi possível concluir que a distribuição das ondas no interior do forno não se procede de forma uniforme, uma vez que parte das ondas eram absorvidas pelas paredes metálicas e grande parte delas eram refletidas pelas paredes do forno.

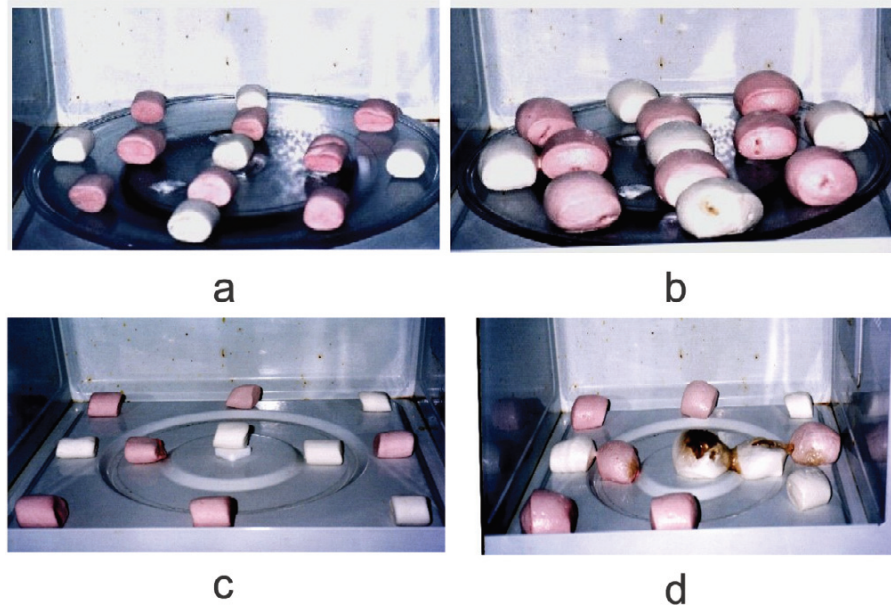


Figura 3.2 – Aquecimento com micro-ondas: (a) e (b) - antes e depois da irradiação com prato giratório; (c) e (d) - antes e depois da irradiação sem prato giratório (Rosini et al, 2004)

Através da análise da Figura 3.2 é possível observar que quando foi utilizado o prato giratório, (a) e (b), os marshmallows expandiram-se de forma semelhante, e com isso obteve-se um aquecimento mais uniforme, uma vez que a distribuição da radiação foi mais homogênea.

Por outro lado, quando não se usou o prato giratório, (c) e (d), comprovou-se um aquecimento excessivo na zona central do forno, pois trata-se de um dos pontos de maior incidência de radiação micro-ondas.

No processamento térmico convencional, a energia transfere-se para o material através de convecção, condução e radiação de calor, iniciando-se nas superfícies do material. Este fenómeno consiste na transferência baseada em gradientes térmicos, enquanto que no aquecimento por micro-ondas o fenómeno dá-se por excitação molecular, ou seja, a energia eletromagnética é convertida em energia térmica. O aquecimento por micro-ondas resulta numa absorção direta da energia pelos materiais, quando comparado com o aquecimento por convecção (Benedetto et al, 2013).

Porém, também se pode mencionar que as micro-ondas produzem um gradiente térmico. No entanto, trata-se de um gradiente térmico invertido, uma vez que a irradiação de micro-ondas permite que uma região mais profunda aqueça de forma mais eficaz do que à superfície do pavimento. O fenómeno de gradiente invertido acontece devido à evaporação da humidade, que é movida para a superfície do pavimento devido à aplicação de micro-ondas.

Uma vez que as micro-ondas possuem a capacidade de penetração quase instantânea nos materiais a profundidades de vários centímetros ou mais, o calor gerado consegue ser gerado ao longo do volume de todo o material. O resultado final acaba por se tratar de um aquecimento rápido e homogéneo do pavimento a profundidades consideráveis.

Foram realizados vários estudos por parte do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Roma (Benedetto et al, 2013), com a finalidade de estudar as várias potencialidades do aquecimento de misturas betuminosas por micro-ondas. Num dos estudos, várias amostras foram colocadas num micro-ondas e aquecidas com uma frequência de 2,45 GHz, a uma potência de 850 W. Após isso, as amostras foram retiradas do micro-ondas e foram medidas as temperaturas à superfície e em duas profundidades (2,5 e 5 cm).

Com a elaboração deste ensaio foi possível concluir que à temperatura de 150 °C, temperatura a qual é normalmente realizada a mistura de agregados e betume na produção de misturas, é atingível em cerca de $\frac{1}{4}$ do tempo que normalmente é necessário quando se utiliza um forno convencional para o aquecimento. Também foi possível concluir que as perdas térmicas verificadas eram pouco significantes e muitas das vezes com valores inferiores a 3 °C.

Quanto ao consumo energético para aquecimento do material, comparando os valores do forno convencional e do micro-ondas, estes foram cerca de 2,6 kWh e de 0,4 kWh, respetivamente.

Existem propriedades que têm influência na permissividade do betume, isto é, na habilidade do betume se polarizar em resposta a um campo elétrico aplicado. Além da frequência aplicada e da temperatura, a densidade, o tipo de agregado e o seu tamanho, índice de humidade, idade e teor do betume são propriedades a ter em conta (Benedetto et al, 2013).

De acordo com ensaios realizados anteriormente foi demonstrado que a origem dos materiais utilizados pode influenciar de forma severa o processo de aquecimento por micro-ondas, uma vez que os materiais possuem características dielétricas diferentes (Ulaby et al, 1990 e Peinsitt et al, 2010). É exemplo disso a eficácia comprovada do basalto, quando submetido a micro-

ondas, pois é possível atingir a temperatura na mistura dos agregados na sua produção, os 150 °C, num tempo relativamente mais curto.

Na opinião de Terrel e Al-Ohaly, as elevadas propriedades dielétricas da água poderiam ser utilizadas como uma vantagem no aquecimento de misturas com pequenas quantidades de água. Baixos teores de água, inferiores a um por cento, permitem que a taxa de aquecimento supere mais rapidamente o efeito de arrefecimento por evaporação. Para comprovar o que foi mencionado, os autores procederam à preparação de amostras de agregados com diferentes teores de água e posteriormente aquecidos num micro-ondas. Na Figura 3.3, é apresentada a relação entre o tempo e a temperatura no aquecimento de agregados molhados.

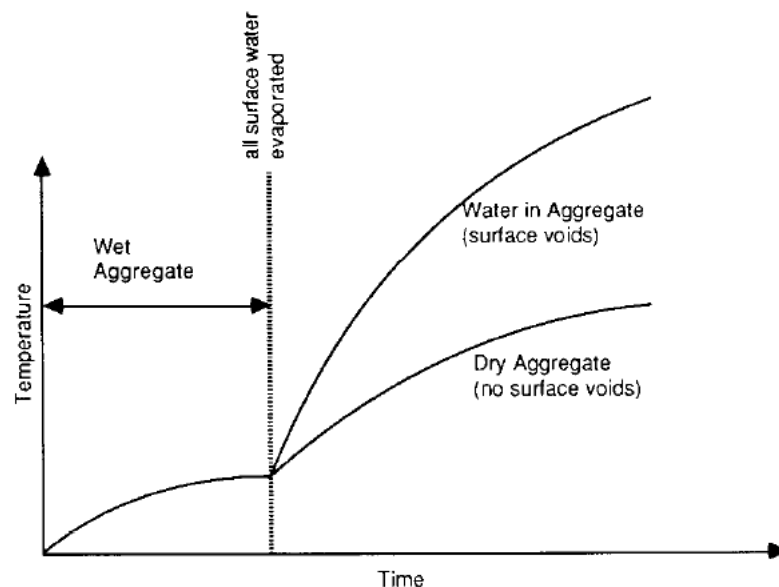


Figura 3.3 - Relação Tempo-Temperatura no aquecimento de agregados molhados (Terrel e Al-Ohaly, 1987)

As amostras que foram preparadas com diferentes quantidades de água, foram: amostra seca (Dry), superfície saturada seca (SSD), em que os vazios entre as partículas são preenchidos com água e esta não existe nas superfícies exposta, e húmida (Wet). Posteriormente foram sujeitas a um aquecimento com microondas, durante um período de tempo.

A Figura 3.4 ilustra o efeito profundo de pequenas quantidades de água (normalmente menos do que 0,75 por cento). Esta pequena quantidade de água permite que o agregado SSD aqueça muito rapidamente, atingindo mais de 300 F (149 °C) em comparação com apenas 160 F (71 °C) quando estamos perante cerca de 14% de água, em apenas 3 minutos de radiação. Na Figura

3.4 também é possível visualizar os resultados obtidos após aplicação de 5 e 7 minutos de radiação de micro-ondas.

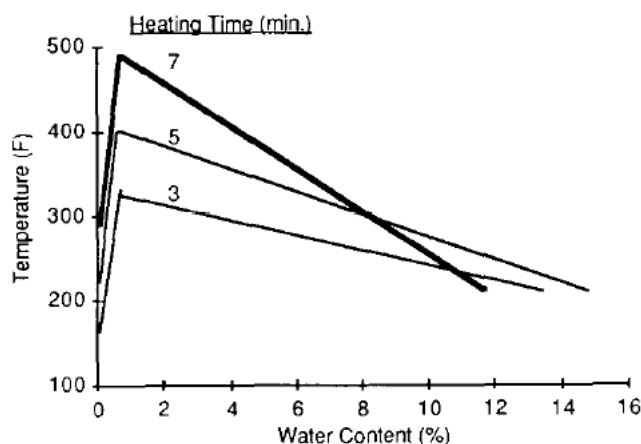


Figura 3.4 – Efeito do índice de humidade no aquecimento no micro-ondas (Terrel e Al-Ohaly, 1987)

A Figura 3.5 ilustra uma taxa uniforme de aquecimento para agregado seco (Dry), que vai desde a temperatura ambiente até cerca de 325 F (163 °C), em 7 minutos. A amostra húmida (Wet), embora aqueça rapidamente nos momentos iniciais, atinge um patamar de cerca de 210 F (99 °C), até que a água evapore, e em seguida retoma o aquecimento a uma taxa semelhante à alcançada pela SSD, atingindo cerca de 410 F (210 °C).

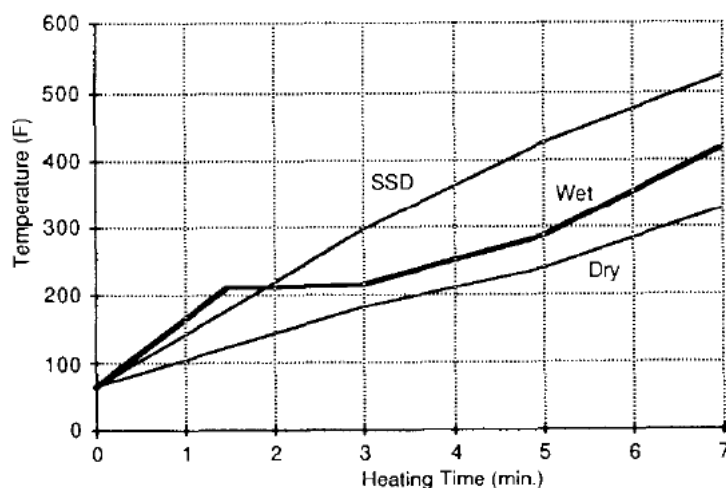


Figura 3.5 – Efeito do índice de humidade e tempo de aquecimento de diferentes agregados no micro-ondas (Terrel e Al-Ohaly, 1987)

Em casos reais, pode utilizar-se a técnica de aquecimento por micro-ondas quando se está perante uma área de pavimento que possui várias fendas ou buracos, e através do aquecimento por micro-ondas pode ser rapidamente amolecido e posteriormente, poderão ser adicionados novos materiais para conferirem novas propriedades ao pavimento, e então proceder-se a uma remistura e compactação destes.

3.3. Aquecimento com adição de aditivos metálicos

Little e Bhasin (2007) sustentam que as misturas asfálticas curam em diferentes graus de temperatura devido ao fenómeno de difusão de moléculas entre os dois lados de uma fenda, após a remoção de uma carga, o que torna possível a ligação entre ambas as faces. A cura só se torna possível quando uma força ou tensão é induzida e esta possui capacidade suficiente para originar dano no material. Um aumento da temperatura irá aumentar significativamente a possibilidade de cura do pavimento, e com isso torna-se possível que o pavimento consiga ter níveis de resistência semelhantes ao material inicial.

De acordo com Daniel e Kim (2001), é possível obter auto-cura de um material aquando são registadas temperaturas na ordem dos 50-60 °C, pois a estas temperaturas verifica-se um amolecimento do ligante.

No entanto, autores como Liu et al (2010), aqueceram várias amostras de misturas fendilhadas, e apontam para temperaturas compreendidas entre 70 e 120 °C, nas quais se torna possível em vários casos obter 100% de auto-cura. Para obterem estes resultados, os autores estabeleceram uma técnica para o aquecimento de misturas betuminosas por indução eletromagnética que consiste na incorporação de aditivos metálicos, tais como lã de aço e grafite. Estes materiais, ao serem adicionados, melhoram a condutividade das misturas, tornando-as mais suscetíveis à indução, permitindo um aquecimento mais eficaz relativamente ao uso de energia.

O estudo de Galego et al (2013), consistiu no aquecimento no forno de micro-ondas de misturas betuminosas com lã de aço durante 120 segundos, ao qual a cada 20 segundos foi lida a temperatura à superfície. Após os 120 segundos foi introduzido um termómetro no material, a fim de conhecer a temperatura no seu interior. Isto torna-se possível devido ao amolecimento da mistura, verificado a temperaturas elevadas.

Nos estudos realizados as misturas continham lã de aço com 5 mm e com 10 mm de comprimento, com diferentes percentagens relativamente à massa do material. Foram utilizados

dois tipos de lã de aço: uma denominada "lã de aço grossa" (CSW), com fios de 0,10-0,12 mm de espessura, e outra chamada "lã de aço média" (MSW), com uma espessura de 0,04-0,06 mm. As Figuras 3.6 (a) e 3.6 (b) mostram a evolução das temperaturas para cada comprimento de lã de aço, mas também a temperatura verificada à superfície e no seu interior.

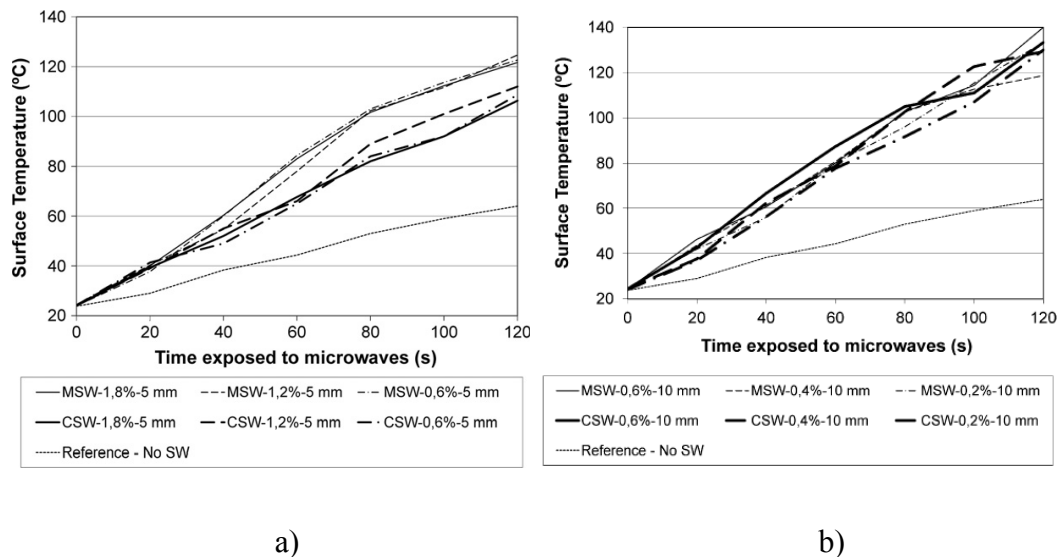


Figura 3.6 – Evolução da temperatura à superfície das misturas betuminosa com lã de aço de 5 mm (a) e 10 mm (b) (Galego et al, 2013)

Comparando ambas as temperaturas verificadas à superfície, os autores concluíram que misturas com pedaços de lã de aço de 10 mm registavam temperaturas mais elevadas em cerca de 20 °C, quando comparadas às misturas com pedaços de lã de aço de 5 mm, assumindo que a eficiência energética originada pela lã de aço de 10 mm é maior que a lã de aço de 5 mm.

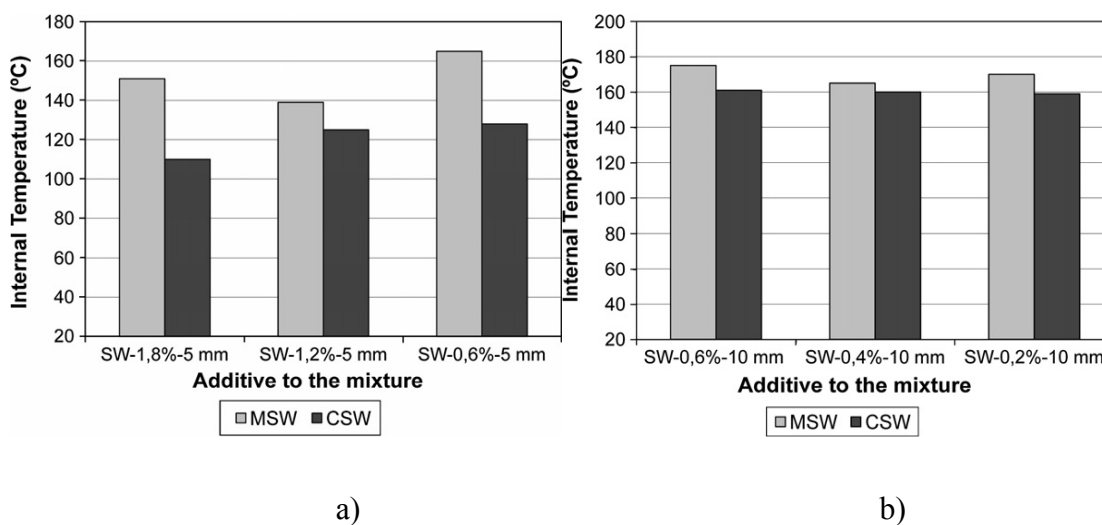


Figura 3.7 – Temperatura interna após 120 segundos de aquecimento em micro-ondas em misturas com lã de aço de 5 mm (a) e 10 mm (b) (Galego et al, 2013)

Relativamente a temperaturas internas, torna-se evidente que o uso de lâ de aço de 10 mm de comprimento, faz com que sejam atingidas temperaturas mais elevadas, cerca de 20° C, quando comparadas com as verificadas com lâ de aço de 5 mm.

Por fim, foi possível concluir que para ambos os comprimentos de lâ de aço, as temperaturas internas eram sempre ligeiramente mais elevadas do que as temperaturas verificadas à superfície, devido à dissipação do calor que acontece à superfície.

Wu et al (2006), foram pioneiros no que diz respeito à realização da primeira mistura condutora elétrica através da adição de fibras de carbono, grafite, entre outros. Com isto, foram capazes de afirmar que a condutividade cedida, isto é, a facilidade do material ser capaz de conduzir uma corrente elétrica, é proporcional ao volume de material de enchimento ou fibras condutoras adicionadas. Quando se adiciona um grande número de partículas condutoras poderá acontecer que certas propriedades sejam perdidas, tais como a resistência ou a trabalhabilidade dos materiais.

Também foi demonstrado que relativamente a um aumento da condutividade para uma mistura é mais eficaz a adição de fibras condutoras do que uma adição de uma carga condutora.

Na indústria do betume, o aquecimento através de indução trata-se de uma nova técnica que começou a ser desenvolvida por Garcia et al (2009). Os autores mostraram que a condutividade é proporcional ao volume de agregados na mistura e que existe um volume ótimo de partículas eletricamente condutoras a ser adicionadas a cada mistura.

Através da adição de fibras condutoras a uma mistura betuminosa torna-se possível a verificação de um aumento da condutividade do ligante fazendo com que a reparação das fissuras existentes possa acontecer de forma eficaz, antes destas ficarem grande demais.

Outro aspeto importante prende-se com o melhoramento do comportamento de envelhecimento e resistência a danos provenientes da água por parte do betume, uma vez que é originado um material relativamente mais espesso.

Numa pesquisa elaborada por Liu et al (2010), foram preparadas amostras de betão betuminoso poroso. As amostras foram realizadas com agregados com tamanho entre 2,0 e 22,4 milímetros, areia de britagem com tamanho entre 0,063 e 2 mm e enchimento do tipo Wigro 60K com tamanho inferior a 0,063 mm. Por fim, o betume usado no estudo foi do tipo 70/100.

As fibras adicionadas foram de dois tipos diferentes, isto é, fibras de aço com diâmetro entre 0,0296 mm e 0,1911 mm, e lã de aço com diâmetros entre 0,00635 mm e 0,00889 mm. Estes tipos de fibras possuem uma resistividade elétrica de $7 \times 10^{-7} \Omega \text{cm}$.

Após a produção das amostras foram realizados vários ensaios, nomeadamente ensaios de resistividade elétrica, de resistência à tração e de aquecimento por indução. No final dos ensaios, concluiu-se que o uso de fibras de aço mais curtas permite uma capacidade de reforço melhorada, comparando com lã de aço.

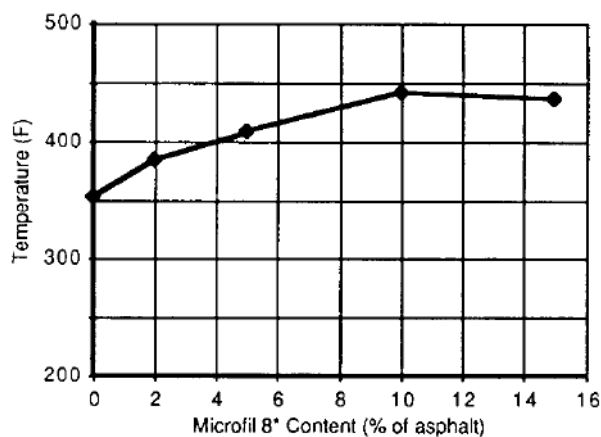
Relativamente à quantidade de fibras utilizadas, 10% foi considerado como o conteúdo ideal, para que o betão betuminoso poroso seja condutor e tenha um rápido aquecimento por indução.

3.4. Aquecimento com adição de aditivos químicos

Existem vários tipos de agregados que podiam permitir uma melhoria aos pavimentos, no entanto, por vezes surgem complicações devido ao facto de agregados de elevado dielétrico não estarem disponíveis localmente. A utilização correta de água, pode ser considerada um aditivo para uma melhoria no aquecimento (Terrel e Al-Ohaly, 1987).

A utilização de aditivos químicos ou minerais no asfalto, trata-se de outra técnica de possível incorporação, uma vez que se trata de elementos quase transparentes para as micro-ondas. Várias pesquisas apontam que muitos materiais conferem constantes dielétricas altas, no entanto, podem não ser adequadas para as misturas betuminosas. Uma vez que já havia sido experimentado com sucesso em misturas asfálticas, o autor seleccionou o carbono preto para adicionar a misturas betuminosas para realização de ensaios (Terrel e Al-Ohaly, 1987).

Na figura que se segue é possível ver a evolução da temperatura após aquecimento no micro-ondas.



* Microfil 8 is 92% carbon black

Figura 3.8 – Efeito da adição de carbono preto a uma mistura betuminosa no aquecimento no microondas por 10 minutos (Terrel e Al-Ohaly, 1987)

Na Figura 3.8, é possível observar que a mistura chega a atingir temperaturas perto dos 450 F, isto é, ligeiramente acima dos 230 °C.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Introdução

No presente capítulo são enunciados e devidamente justificados todos os elementos e métodos utilizados para a realização desta dissertação relativamente ao estudo do aquecimento de misturas betuminosas através do uso de radiação de micro-ondas.

4.2. Materiais

Para o estudo em questão foram utilizados vários tipos de materiais, nomeadamente provetes de várias misturas betuminosas, agregados e betume.

Os provetes testados com o intuito de avaliar o comportamento da temperatura no seu interior e exterior aquando do aquecimento por micro-ondas foram os seguintes:

- Três provetes de mistura betuminosa com agregado de granito, com diferentes tamanhos de agregados;
- Um provete de mistura betuminosa com agregado de calcário;
- Um provete de mistura betuminosa com agregado de basalto;
- Um provete de mistura betuminosa drenante;
- Um provete de mistura betuminosa modificada com borracha proveniente de pneus usados;
- Um provete de mistura betuminosa com 17% de vazios.

Os provetes utilizados nos ensaios laboratoriais tratavam-se de provetes prismáticos com as seguintes medidas $38 \times 5 \times 6 \text{ cm}^3$.

Os agregados que foram utilizados para o estudo nesta pesquisa dividiram-se em dois tipos: um agregado britado fino do tipo 4/6 e um agregado britado médio do tipo 6/14.

Relativamente ao betume utilizado, este foi um betume do tipo 35/50, e o aquecimento procedeu-se utilizando uma pequena caixa de madeira com as seguintes dimensões $5 \times 5 \times 6 \text{ cm}^3$. Embora o betume 50/70 seja o mais utilizado, no momento da realização do estudo o betume 35/50 era o único que se encontrava acessível.

Com o propósito de se manter o provete intacto durante o aquecimento, uma vez que a altas temperaturas este acabava por se desintegrar comprometendo o estudo, resolveu-se por utilizar uma caixa de madeira feita à medida, para que fosse possível manter o provete estável. Na Figura 4.1 é possível ver a caixa mencionada anteriormente, utilizada para no aquecimento dos provetes.

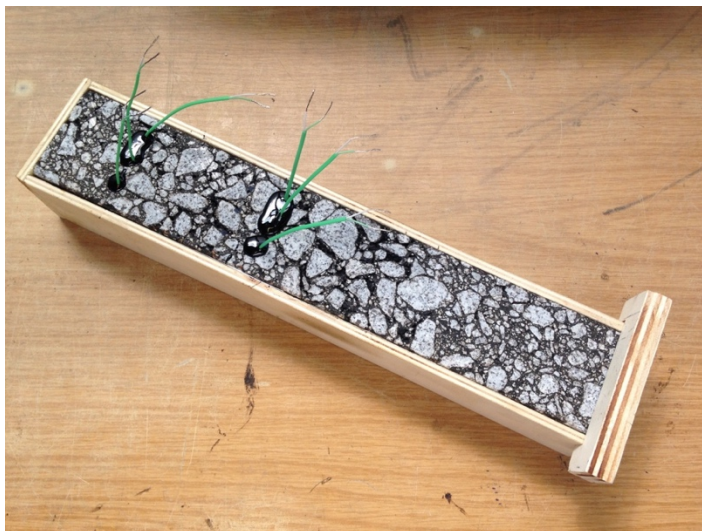


Figura 4.1 - Caixa de madeira utilizada para no aquecimento dos provetes

Através da análise da Figura 4.1, pode-se observar a utilização de sondas para medição de altas temperaturas para obtenção das temperaturas a diferentes profundidades ao longo do provete. Na Figura 4.2 é possível a observação ao pormenor as sondas usadas no estudo.

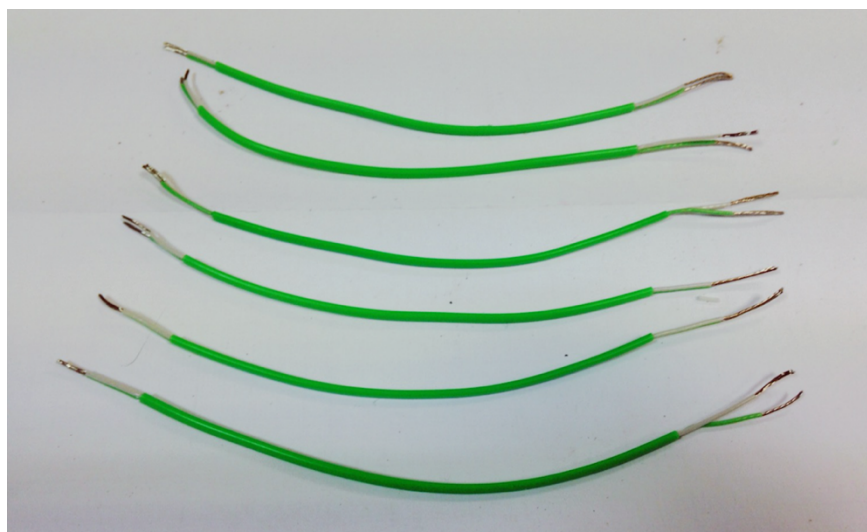


Figura 4.2 - Sondas para altas temperaturas

4.3. Equipamentos

No que diz respeito aos equipamentos que foram utilizados para a realização desta dissertação foram os seguintes:

- **Micro-ondas**

O micro-ondas utilizado trata-se de um eletrodoméstico comum, sendo que as características relevantes para esta pesquisa são as seguintes:

- Tipologia de micro-ondas: Grill;
- Potência entre 701 a 900W;
- 5 níveis diferentes de potência;
- Capacidade de 25 a 30L, sendo possível a introdução dos provetes no seu interior.

Na Figura 4.3 é possível observar o equipamento relatado anteriormente e que foi usado para a realização dos vários ensaios, necessários para a realização deste trabalho.



Figura 4.3 - Micro-ondas

- **Hanna Instruments**

Com a utilização deste aparelho tornou-se possível conhecer as temperaturas em várias profundidades, conforme o pretendido, nos provetes testados. Foi possível então conhecer de uma forma relativamente rápida as temperaturas no interior dos provetes.

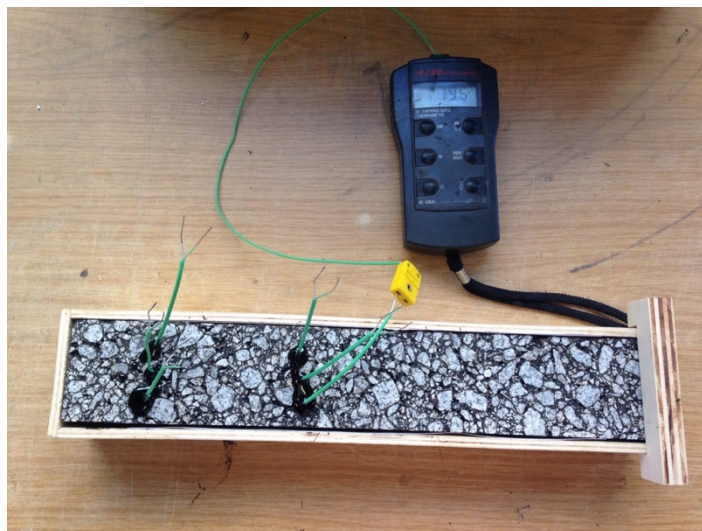


Figura 4.4 – Hanna Instruments

Na Figura 4.4 é possível observar a forma adotada para medição das temperaturas no interior do provete através do uso do Hanna Instruments.

- **Termómetro infravermelho com mira laser**

O uso deste equipamento deveu-se à intenção de descobrir a temperatura à superfície, relativamente a meio do provete. Conseguiu-se assim, como se pode constatar na Figura 4.4, seis pontos no interior do provete com profundidades diferenciadas e um ponto à superfície. Na Figura 4.5 é possível observar o termómetro infravermelho com mira laser utilizado nos ensaios.



Figura 4.5 - Termómetro infravermelho com mira laser

- **Termómetro Calex Soft**

O termómetro Calex foi utilizado com o objetivo de saber a temperatura à superfície ao longo do provete. Através do uso deste instrumento, conseguiu-se então saber as temperaturas em quatro perfis, obtendo uma perceção do comportamento da temperatura à superfície ao longo do provete.



Figura 4.6 - Termómetro Calex Soft

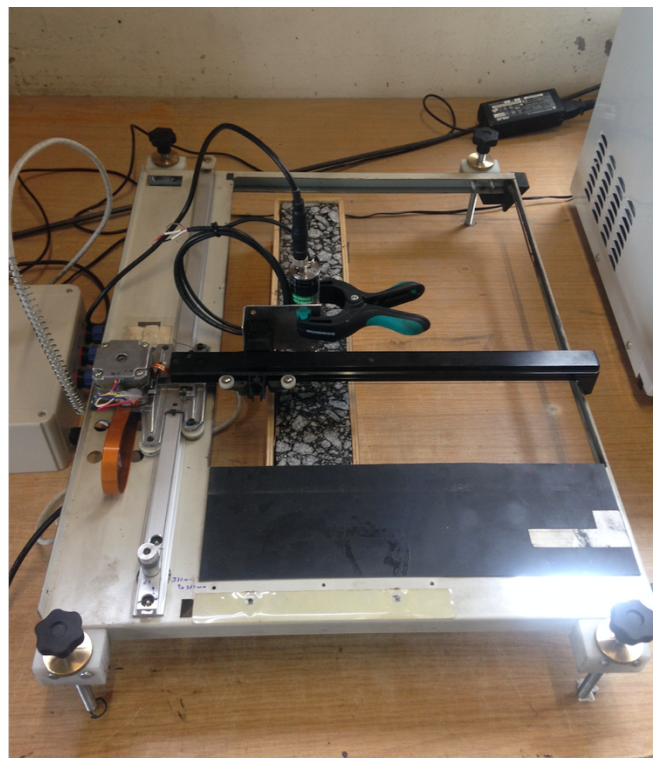


Figura 4.7 - Exemplo da utilização do termómetro Calex Soft

Este tipo de aparelho permite avaliar temperaturas que variam entre -40 a 1000°C , e é bastante utilizado para medir temperaturas da superfície de vários materiais, tais como metal, papel, alimentos, etc. Consegue medir temperaturas com uma precisão de mais ou menos 1% do valor medido, e com uma capacidade de resposta de 240 ms. O funcionamento deste aparelho é através de um raio laser que à medida que se afasta do objeto consegue medir uma área maior, no entanto, possui a contrapartida de não se tratar de um resultado mais fiável. Na Figura 4.8, é possível observar o comportamento do laser, nomeadamente o diâmetro medido à medida que a distância ao material vai aumentando. (Site Consultado nº3)

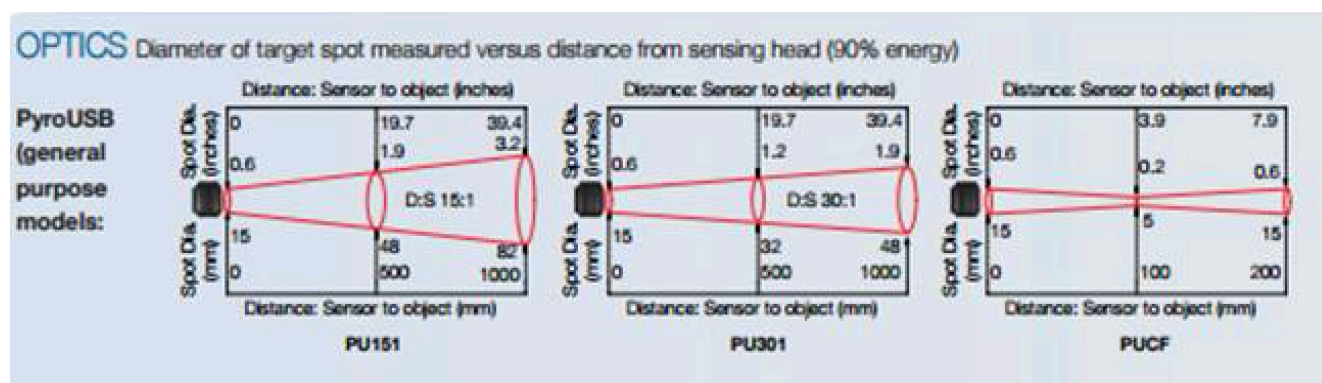


Figura 4.8 - Diâmetro medido versus distância

Neste caso, o laser que foi utilizado nos estudos experimentais realizados foi o modelo PU151. Uma vez que a distância do laser às amostras utilizadas era de cerca de 1 cm, através da análise da Figura 4.8, é possível afirmar que o laser cobriu uma área de mais ou menos 82 mm de diâmetro.

- **dataTaker DT800**

Este aparelho foi utilizado para registar a variação da temperatura nos pontos mencionados quando o aquecimento se procedeu em estufa.

O DT800 possui 42 entradas analógicas, resultando em 42 canais individuais ou 24 canais diferenciais. São suportados vários tipos de medição, nomeadamente DC e AC (RMS) de tensão, corrente, resistência, temperatura, pontes, medidores de tensão e frequência. Os dados podem ser devolvidos em tempo real ou armazenados para a memória RAM interna ou um cartão de memória. (Site consultado nº6)

Na Figura 4.9 apresenta-se o aparelho utilizado para a realização deste estudo experimental.



Figura 4.9 - DataTaker DT800 (Site consultado nº6)

4.4. Metodologia

Para alcançar os objetivos propostos, esta dissertação consistiu na elaboração de um estudo laboratorial, no qual o objetivo principal tratava-se de avaliar o comportamento térmico das misturas betuminosas resultante do aquecimento proveniente da radiação de micro-ondas. Através disso pretendia-se verificar de que modo a temperatura varia ao longo da profundidade dos provetes em estudo.

O desenvolvimento do trabalho teve por base o aquecimento de provetes de mistura betuminosa, como foi descrito anteriormente, e avaliar a sua temperatura no seu interior, mas também conhecer a temperatura à superfície resultante do processo de aquecimento.

Também se procedeu ao aquecimento de componentes individuais das misturas betuminosas, nomeadamente o agregado e o betume. De salientar que relativamente ao agregado só se avaliou a evolução da temperatura à superfície da amostra, uma vez que se tornou difícil a colocação das sondas nas profundidades pretendidas.

Para executar o estudo fez-se seis furos a profundidades diferentes com o intuito de introduzir as sondas para obtenção da temperatura. Seguidamente, preencheu-se os espaços com betume,

fazendo assim com que não fosse possível perdas de temperatura aquando o contato com o meio ambiente.

Na Figura 4.10 é possível observar a distribuição dos furos efetuados nos provetes testados, assim como a profundidade a que se colocaram cada uma das sondas de temperatura.

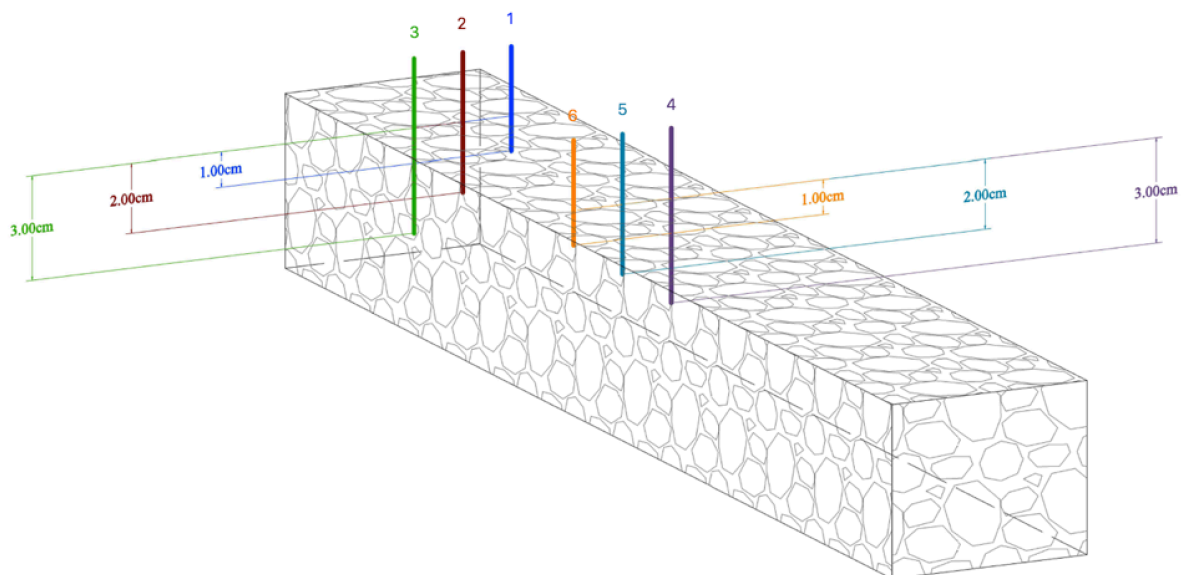


Figura 4.10 – Distribuição dos furos

Na Figura 4.11 ilustra o espaçamento adotado na colocação de sondas nos provetes. Optou-se por esta distribuição uma vez que numa fase inicial estava previsto o estudo ao longo do provete todo. Como se tratava de muitos pontos para serem analisados, o que demorava algum tempo e com isso era provável obter perdas de temperatura, resolveu-se fazer uma distribuição simétrica e analisar metade do provete.

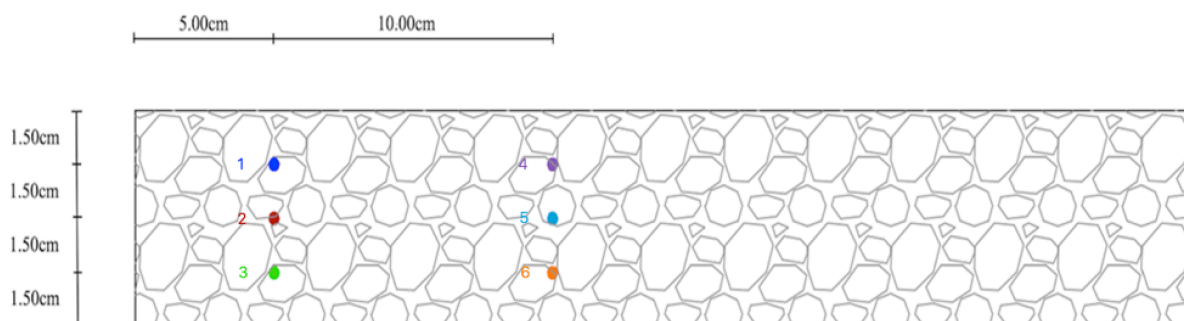


Figura 4.11 - Espaçamento entre sondas

Uma vez que os provetes eram um pouco compridos para o micro-ondas disponível no laboratório, não se tornou possível a utilização do prato giratório aquando o aquecimento das misturas betuminosas, tal como se pode constatar na Figura 4.12. Devido ao fato de não se ter utilizado o prato giratório, o aquecimento não se procedeu de forma homogênea a toda a mistura, o que foi constatado ao fim dos primeiros ensaios e como foi provado no estudo realizado por Rosini et al (2004), no ensaio realizado utilizando marshmallows como elemento a aquecer.



Figura 4.12 - Exemplo do posicionamento dos provetes no interior do micro-ondas

O aquecimento tanto das misturas betuminosas como dos agregados britados e do betume foram realizados utilizando três dos cinco níveis de potência existentes do micro-ondas, nomeadamente: 180 Watts, 540 Watts e 900 Watts.

Para as diversas potências do micro-ondas utilizadas, o tempo de aquecimento das misturas variou. A variação do tempo procedeu-se através do seguinte princípio: à medida que a potência aumentava, diminuía-se o tempo de aquecimento. Este método também surgiu devido ao fato de nos ensaios iniciais, em que se manteve o mesmo tempo de aquecimento para todas as potências, nas mais elevadas as sondas acabavam por faiscar e/ou derreter, fazendo com que o estudo fosse interrompido e então era necessário proceder à realização de um novo.

Também é de realçar o critério de paragem para cada ensaio, nomeadamente quando se atingia a temperatura pretendida para a potência aplicada, após a repetição de um certo número de ciclos. Cada ciclo consistia no aquecimento da mistura e da medição da temperatura atingida com o aquecimento.

Posto isto, apresenta-se de seguida o tempo de aquecimento, mas também o limite de temperatura da mistura utilizados para cada potência:

Quadro 4.1 - Processo de aquecimento

Potência	Tempo de Aquecimento (Ciclos)	Limite de Temperatura
180 Watts	2 minutos	60 °C
540 Watts	1 minuto	60 °C
900 Watts	20 segundos	100 °C

Com o objetivo de analisar de uma forma mais eficaz a variação da temperatura dos provetes ao longo da superfície, aqueceram-se os provetes no micro-ondas, utilizando as potências de 180, 540 e 900 Watts, durante 1 minuto e depois com auxílio do termómetro Calex, foi possível traçar 4 perfis ao longo do provete. Na Figura 4.13, apresenta-se a disposição dos perfis enunciados. Cada linha dos gráficos que serão apresentados sobre este estudo, no capítulo de Resultados e Análise, representam o acumular de tempo de aquecimento.

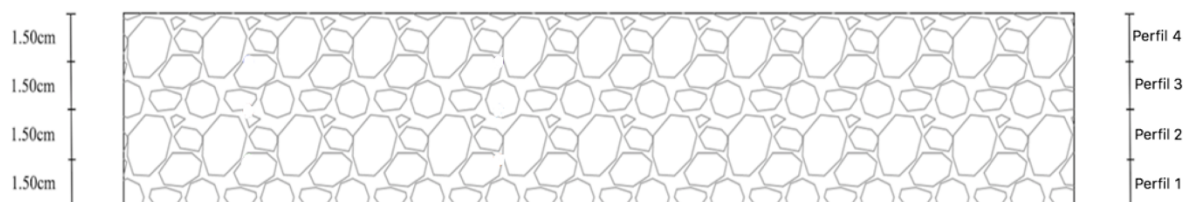


Figura 4.13 – Perfis na análise da temperatura à superfície

Na Figura 4.14 é possível ver a área de trabalho e os materiais utilizados para a realização do estudo descrito anteriormente. Também na figura torna-se possível ver que a análise dos perfis foi realizada fora do micro-ondas.

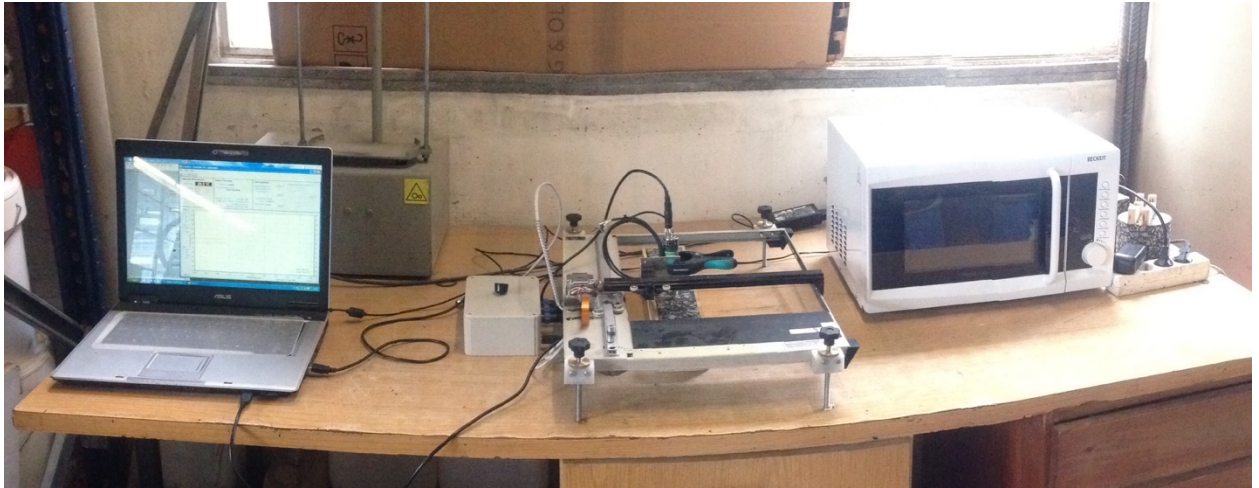


Figura 4.14 - Análise da evolução da temperatura dos provetes à superfície

Uma vez que não existiam dois provetes para cada tipo de mistura, e como já se tinha procedido à colocação de sondas de altas temperaturas, só se tornou possível analisar os provetes em que foi possível arranjar em laboratório provetes referentes à mesma mistura para a realização deste estudo: provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm, provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm, provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm, provete de mistura betuminosa com agregado de calcário e provete de mistura betuminosa com agregado de basalto.

Com vista à comparação da evolução das temperaturas entre o processo de aquecimento por radiação de micro-ondas e aquecimento convencional, realizou-se outro estudo experimental. Colocaram-se numa estufa, previamente aquecida a 150 °C, os seguintes provetes: provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm, provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm, provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm, provete de mistura betuminosa com agregado de calcário, provete de mistura betuminosa com agregado de basalto, provete de mistura betuminosa drenante, provete de mistura betuminosa modificada com borracha proveniente de pneus usados e provete de mistura betuminosa com 17% de vazios.

Através das sondas de altas temperaturas colocadas nos furos antes de se introduzir o provete na estufa, e com o auxílio do dataTaker DT800 monitorizou-se a evolução da temperatura nos diversos furos até que fossem atingidos os 150 °C.

A Figura 4.15 retrata os elementos utilizados para o aquecimento dos provetes em estufa.



Figura 4.15 - Aquecimento de provetes em estufa

Com os resultados obtidos no aquecimento de provetes numa estufa, e uma vez que também se procedeu ao aquecimento por radiação de micro-ondas foi possível comparar os tempos necessários para obtenção de determinadas temperaturas, realizando o aquecimento pelo método convencional e por radiação de micro-ondas.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

5.1. Introdução

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho relativamente ao estudo do aquecimento de misturas betuminosas recorrendo ao aquecimento por micro-ondas.

Para cada mistura betuminosa aqueceram-se os provetes utilizando as três potências já referenciadas, nomeadamente 180 Watts, 540 Watts e 900 Watts, até se conseguir atingir o limite de temperatura desejado.

Através dos valores obtidos durante o aquecimento em cada sonda, adicionou-se uma linha de tendência a esses valores, e utilizando uma regressão linear obteve-se a equação para cada linha de tendência, assim como o valor do coeficiente de determinação (R^2) para cada uma.

Realizaram-se ainda mais dois estudos para entender a evolução da temperatura nos diversos provetes, nomeadamente:

- Aquecimento em estufa e monitorização com sondas de altas temperaturas através do aparelho dataTaker DT800;
- Utilização do termómetro Callex Soft para análise da evolução da temperatura à superfície.

No fim de cada estudo realizado, apresenta-se os resultados obtidos, assim como uma análise pormenorizada dos mesmos.

Uma vez que se obteve muitos resultados na utilização do termómetro Callex Soft para análise da evolução da temperatura à superfície, resolveu-se apenas por apresentar os valores do perfil 3, uma vez que se encontra na zona central dos provetes, com aplicação da potência de 900 Watts. No entanto, em anexo serão disponibilizados os valores restantes do estudo, nomeadamente para os vários perfis em estudo e para as diversas potências de radiação de micro-ondas aplicadas.

Também se providenciou uma análise tendo em conta a influência da potência aplicada a cada

provete, comparando as temperaturas obtidas utilizando cada uma das potências, nomeadamente no ponto 5, situado na zona central do provete a 2 cm de profundidade.

5.2. Granito

O granito é um tipo de rocha ígnea ou rocha magmática de grão fino não metamórfica, composta principalmente por três tipos de minerais, quartzo, mica e feldspato. Por se tratar de um tipo de rocha sólida, dura e resistente é bastante usada como rocha ornamental e na construção civil (Site Consultado nº 4).

Posto isto, e como foi enunciado anteriormente, foram diversos os provetes testados em que o agregado se tratava de granito.

De seguida apresenta-se os resultados alcançados para cada tipo de provete testado, aplicando as três potências referenciadas.

5.2.1. Provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm

O provete que foi utilizado para a realização desta experiência foi o que pode ser observado na Figura 5.1.

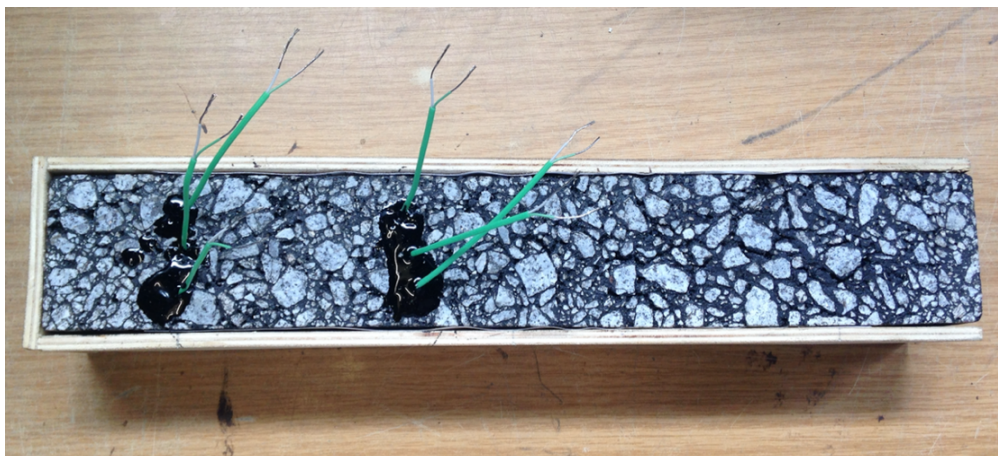


Figura 5.1 - Provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm

Posto isto, os valores que se obtiveram ao longo dos estudos neste provete podem ser observados nas seguintes figuras.

■ Potência de 180 Watts

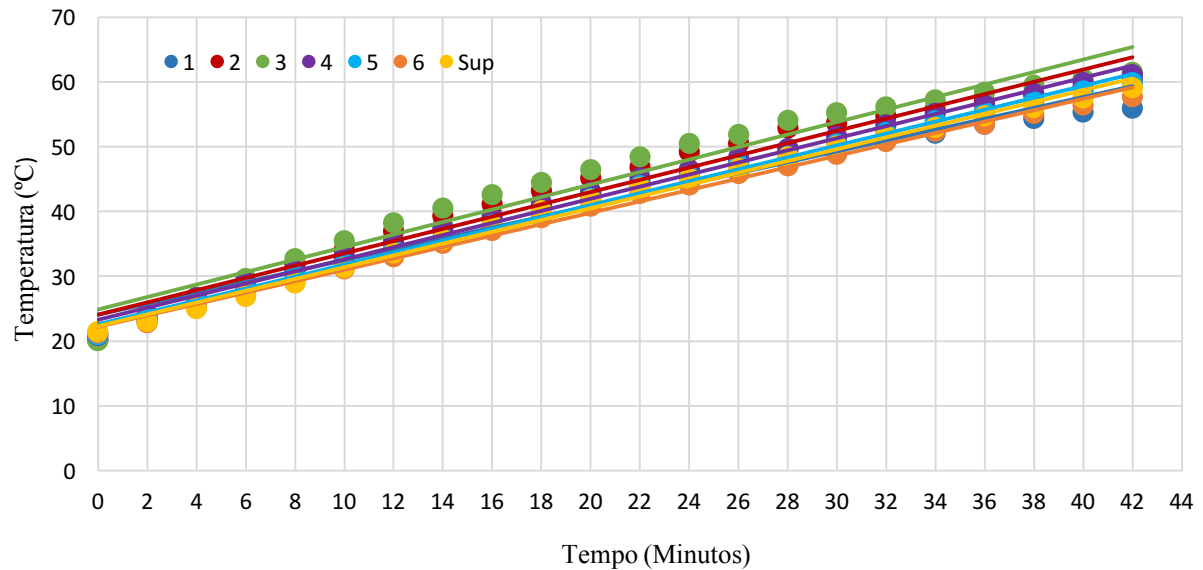


Figura 5.2 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts

Quadro 5.1 – Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.2

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 0.8403x + 24.091$	0.96962
2	$y = 0.9455x + 24.045$	0.97104
3	$y = 0.9663x + 24.807$	0.96573
4	$y = 0.9348x + 23.264$	0.99468
5	$y = 0.9202x + 22.539$	0.99601
6	$y = 0.879x + 22.227$	0.99573
Sup	$y = 0.9109x + 22.249$	0.99412

Após os ensaios realizados e da análise do gráfico da Figura 5.2, é possível tirar algumas conclusões, nomeadamente:

- O ponto que atingiu uma temperatura mais elevada foi o ponto 3, situado na extremidade do provete e a 3 cm de profundidade;

- Os pontos que estavam a profundidades maiores, nomeadamente a 2 e 3 cm, atingiram temperaturas mais elevadas do que os situados a 1 cm, no mesmo intervalo de tempo, o que demonstra um aquecimento do interior para o exterior;
- Pelas equações do gráfico das linhas de tendência, pode-se dizer que em média verificou-se um aumento da temperatura de cerca de 0,9 °C por minuto.

▪ Potência de 540 Watts

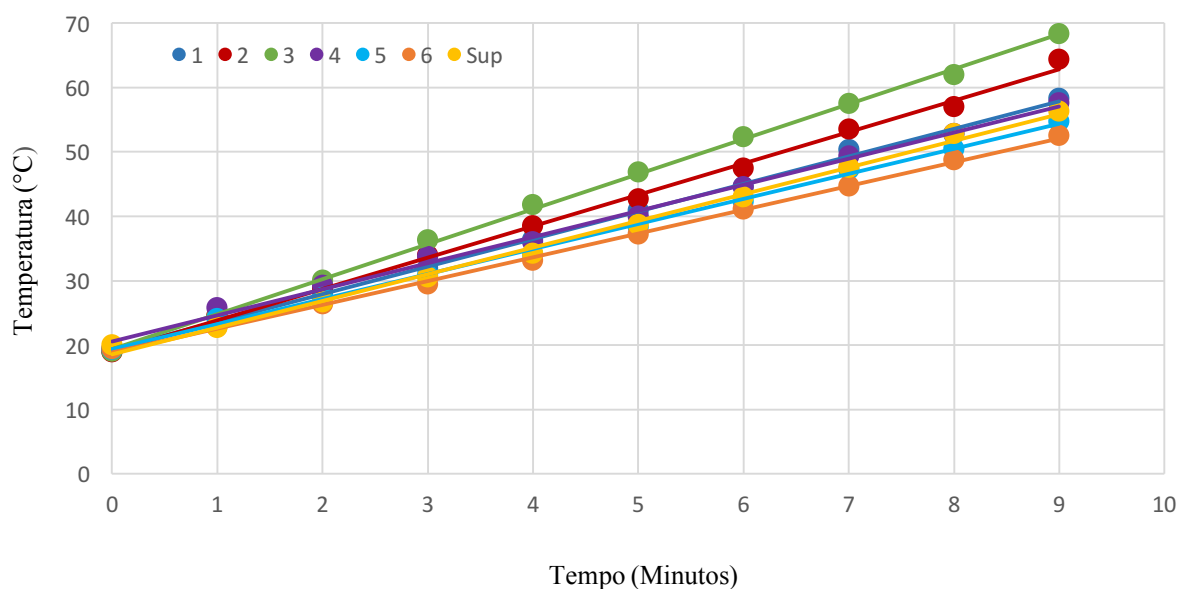


Figura 5.3 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts

Quadro 5.2 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.3

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 4.2721x + 19.385$	0.99809
2	$y = 4.8697x + 19.016$	0.99736
3	$y = 5.4364x + 19.336$	0.99908
4	$y = 4.0576x + 20.551$	0.99591
5	$y = 3.8867x + 19.34$	0.99816
6	$y = 3.6945x + 18.875$	0.99893
Sup	$y = 4.143x + 18.576$	0.99631

As conclusões que se pode obter na utilização desta potência são as seguintes:

- Tal como na utilização da potência mais baixa, os pontos que registaram temperaturas mais elevadas foram os pontos das extremidades do provete, nomeadamente os pontos a 2 e 3 cm de profundidade;
- Houve um ligeiro afastamento das linhas de tendência dos pontos 2 e 3, comparando com as linhas dos restantes;
- O ponto 3, situado a 3 cm de profundidade, voltou a ser o ponto em que se obteve temperaturas mais elevadas;
- Através do Quadro 5.2, é possível observar o coeficiente de determinação de cada linha de tendência, e então pode-se dizer que a temperatura assumiu um comportamento linear;
- No entanto, verifica-se que as linhas de tendência não se encontram tão próximas umas das outras como se tinha verificado com a potência baixa.

▪ Potência de 900 Watts

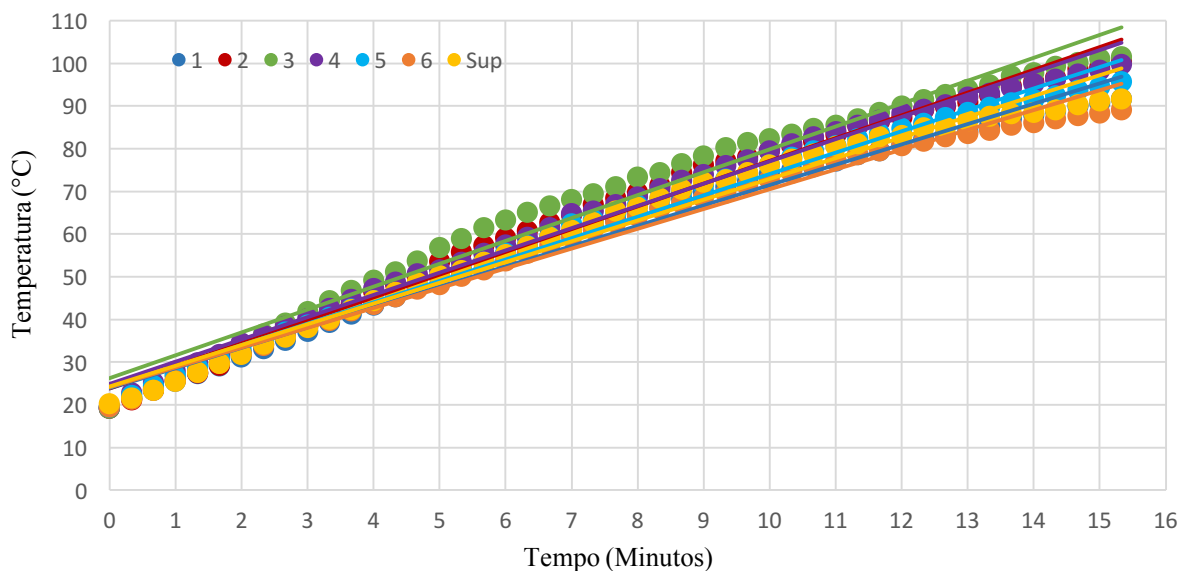


Figura 5.4 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts.

Quadro 5.3 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.4

Ponto	Equação do gráfico	Coefficiente de determinação (R^2)
1	$y = 4.7665x + 23.746$	0.98568
2	$y = 5.3319x + 23.884$	0.98544
3	$y = 5.3582x + 26.22$	0.9779
4	$y = 5.2132x + 24.864$	0.99067
5	$y = 5.0128x + 23.934$	0.99074
6	$y = 4.6376x + 24.12$	0.98533
Sup	$y = 4.8602x + 24.243$	0.98147

As conclusões que se podem tirar com a utilização da potência máxima para o aquecimento do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm são mencionadas nos seguintes pontos:

- Os pontos a 2 e 3 cm de profundidade registaram temperaturas mais elevadas, comparando com o resto dos pontos, verificando-se também um aquecimento superior no interior;
- De realçar também que os pontos das extremidades às profundidades, mencionados no ponto anterior, obtiveram temperaturas mais elevadas;
- Verificou-se um comportamento linear nas temperaturas retiradas ao longo do aquecimento, comprovado pelo coeficiente de determinação presente no Quadro 5.3.

Em suma, é possível evidenciar os aspetos comuns a todo o tipo de potências aplicadas:

- O ponto a 3 cm de profundidade, da extremidade do provete, alcançou sempre temperaturas mais elevadas que o resto dos pontos;
- O ponto 2, com 2 cm de profundidade, presente na extremidade do provete, em todos os casos, aferiu a 2ª temperatura mais alta;
- O aquecimento surgiu, em grande parte, por intermédio de um comportamento linear com o passar do tempo, para qualquer das potências aplicadas;
- Pode-se dizer, neste caso, que o provete aqueceu mais na zona das extremidades do que a meio.

▪ Aquecimento em estufa

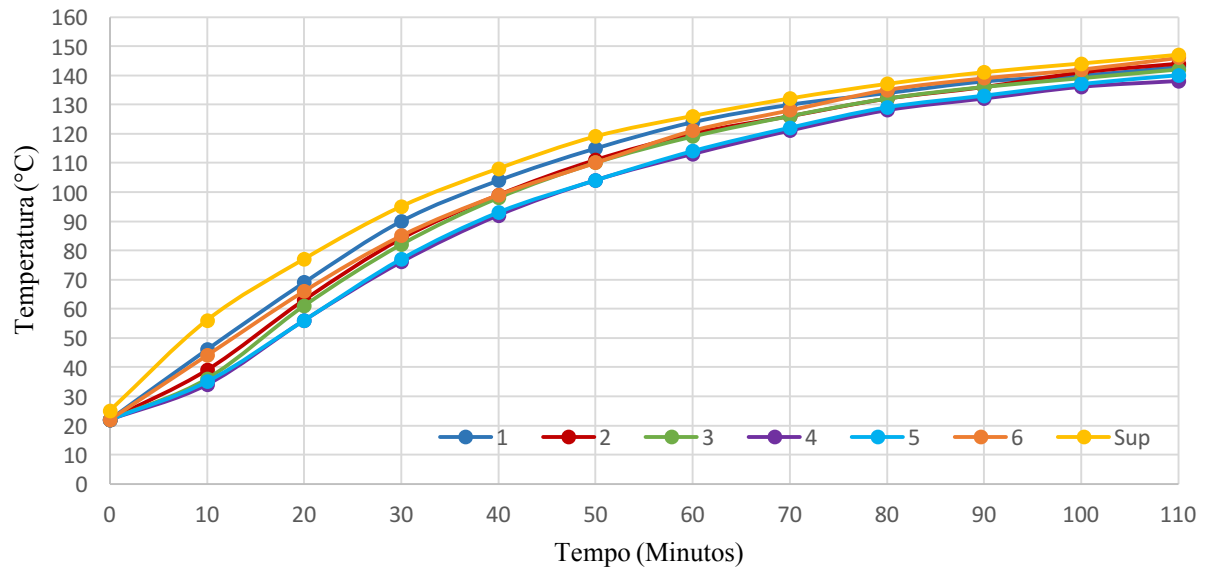


Figura 5.5 - Aquecimento em estufa do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm

Através da observação dos valores registados na Figura 5.5, torna-se possível reparar que a temperatura evolui de forma gradual para todos os furos, no entanto realça-se uma temperatura mais elevada à superfície do provete, facto que não se registou no aquecimento através da radiação de micro-ondas.

Fazendo comparação entre o tempo que levou a que o provete atingisse perto de 100 °C, entre aquecimento no micro-ondas a uma potência de 900 Watts e aquecimento em estufa, verificou-se que o aquecimento através de radiação de micro-ondas foi mais ou menos 30 minutos mais rápido do que fazendo o aquecimento em estufa.

- Análise da evolução da temperatura à superfície através do termómetro Calex Soft

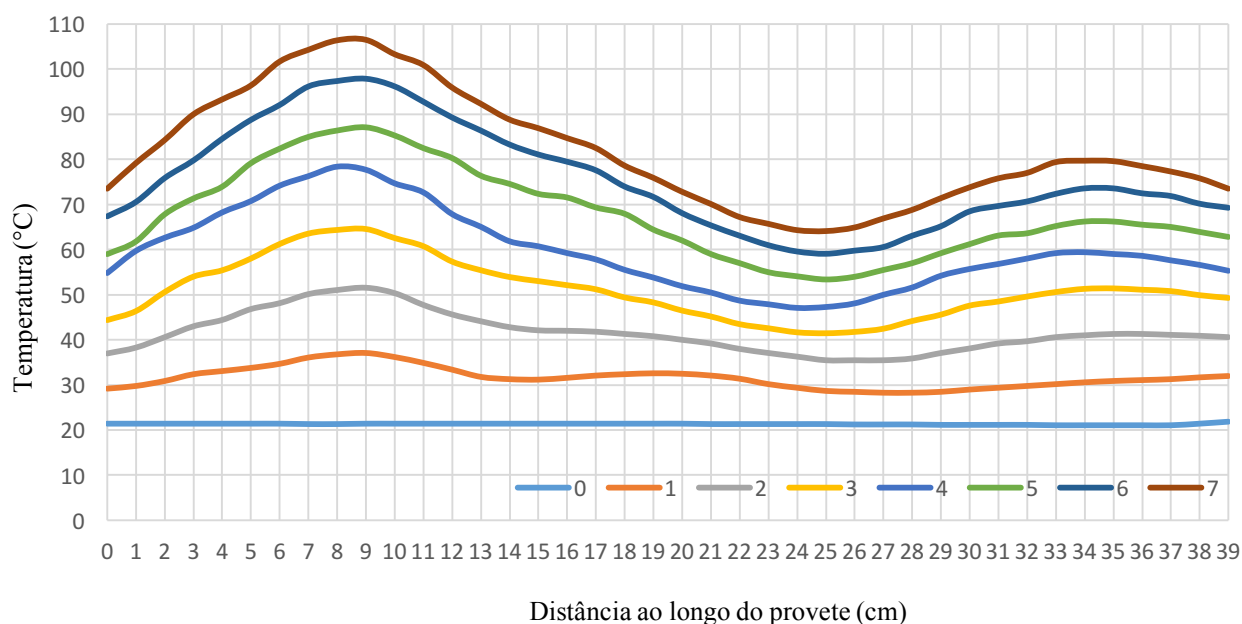


Figura 5.6 - Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

Com a utilização do termómetro Calex Soft e fazendo com que este percorresse a zona central do provete com auxílio da plataforma presente na Figura 4.14, foi possível observar a evolução da temperatura à superfície, como consta a Figura 5.6.

Na Figura 5.6 é possível ver que na zona central do provete a temperatura sofre um pequeno decréscimo após a realização de alguns ciclos. Pelo contrário nas zonas extremas do provete, regista-se um pico de temperatura em cada um. Estima-se que o primeiro pico seja mais pronunciado devido ao facto desta zona se encontrar mais próxima da fonte de energia aquando o aquecimento no micro-ondas. Já o segundo pico de temperatura pode ser explicado da seguinte forma, uma vez que se trata de uma zona perto das paredes do micro-ondas, e uma vez que as micro-ondas são refletidas nas paredes pelo guia de ondas, poderá ter levado a um aquecimento superior na zona em questão.

Influência da potência aplicada

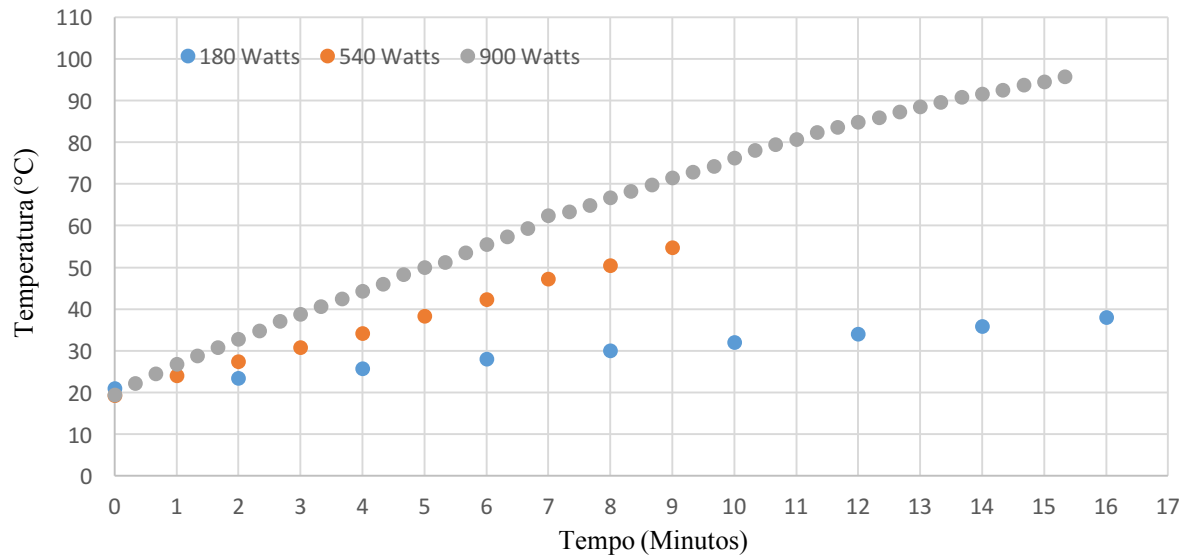


Figura 5.7 – Influência da potência do micro-ondas no aquecimento do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm

Como pode ser visto na Figura 5.7, e através da evolução das temperaturas do ponto 5 situado na zona central a 2 cm de profundidade, após aplicação das 3 potências, para o mesmo intervalo de aquecimento no micro-ondas atinge-se temperaturas superiores quando é aplicada uma potência de 900 Watts. Com apenas 15 minutos de radiação torna-se possível atingir cerca de 100 °C, quando para as outras potências iria demorar um pouco mais, concluindo que à medida que se aumenta a potência de radiação o tempo diminui substancialmente.

5.2.2. Provede de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm

O provede usado no aquecimento que corresponde a este ponto pode ser visualizado na seguinte Figura 5.8.



Figura 5.8 - Provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm

Em seguida são apresentados os gráficos referentes a este estudo.

▪ Potência de 180 Watts

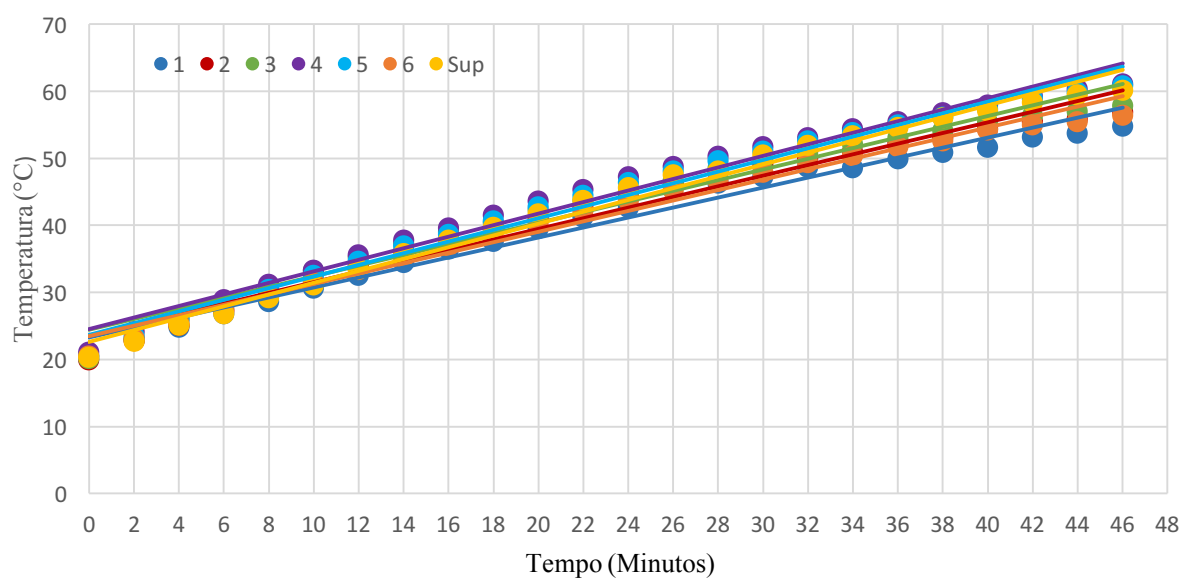


Figura 5.9 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts

Quadro 5.4 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.9

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 0.7443x + 23.28$	0.97636
2	$y = 0.7944x + 23.566$	0.97552
3	$y = 0.7959x + 24.444$	0.9734
4	$y = .8608x + 24.572$	0.98203
5	$y = 0.8691x + 23.699$	0.98423
6	$y = 0.7776x + 23.49$	0.98353
Sup	$y = 0.8817x + 22.639$	0.98718

Neste provete verificou-se as seguintes particularidades:

- O aquecimento foi maior nos pontos 4 e 5, de 3 e 2 cm, respetivamente. Ambos os pontos estão presentes na zona mais central do provete;
- Também é de realçar que a temperatura à superfície também foi elevada, assumindo a terceira temperatura mais alta;
- Os pontos colocados a 1 cm de profundidade obtiveram valores mais baixos, relativamente aos outros.
- Uma vez que as linhas de tendência estão relativamente perto umas das outras, pode-se dizer que o aquecimento foi em média de 0,818 °C por minuto.

▪ Potência de 540 Watts

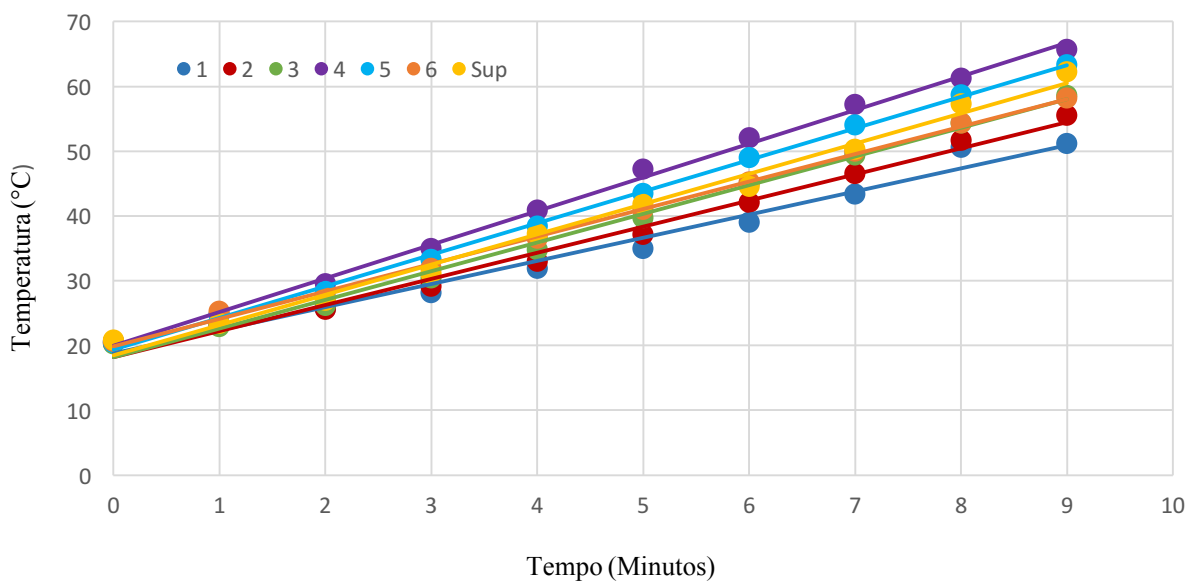


Figura 5.10 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts

Quadro 5.5 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.10

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 3.5709x + 18.751$	0.97905
2	$y = 4.0255x + 18.245$	0.99016
3	$y = 4.4236x + 18.184$	0.99455
4	$y = 5.1945x + 19.975$	0.99734
5	$y = 4.877x + 19.364$	0.99836
6	$y = 4.2352x + 19.922$	0.99732
Sup	$y = 4.6752x + 18.462$	0.99004

Aspetos a ter em conta após o aquecimento do provete a uma potência de 540 Watts:

- Verifica-se um aquecimento superior na zona central do provete;
- Torna-se visível que as temperaturas nos pontos 4 e 5 são as mais elevadas;
- Apesar de assumir um comportamento linear, provado no Quadro 5.5 através do coeficiente de determinação, realça-se um intervalo maior entre as linhas de tendência da temperatura mais alta e mais baixa.

■ Potência de 900 Watts

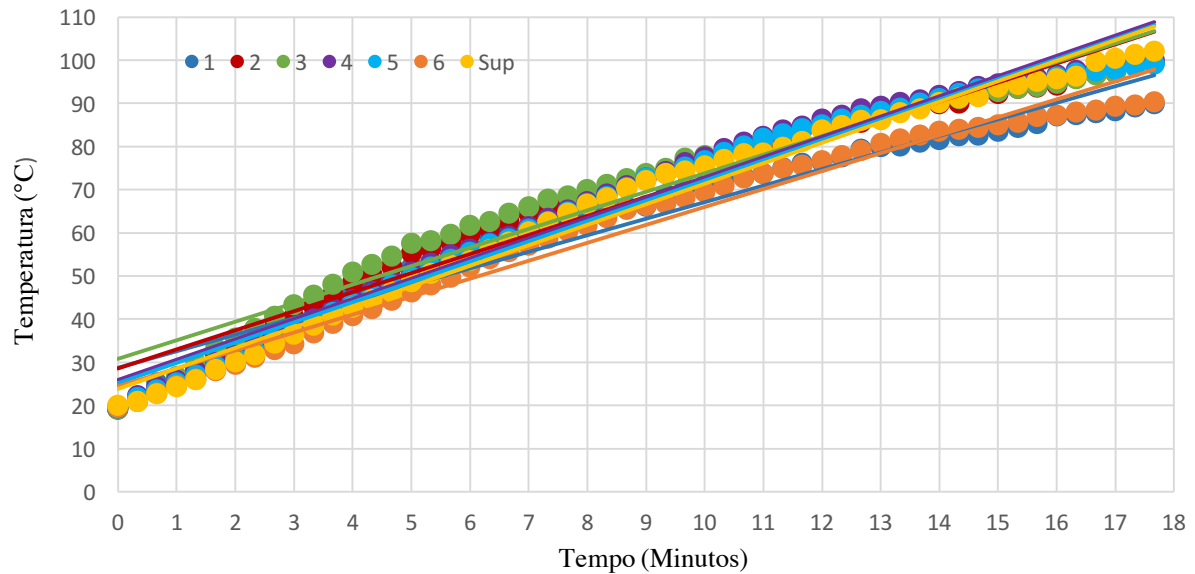


Figura 5.11 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts

Quadro 5.6 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.11

Ponto	Equação do gráfico	Coefficiente de determinação (R^2)
1	$y = 3.8444x + 28.663$	0.95663
2	$y = 4.4137x + 28.621$	0.96506
3	$y = 4.3004x + 30.769$	0.9561
4	$y = 4.6965x + 25.836$	0.97495
5	$y = 4.6949x + 25.11$	0.9751
6	$y = 4.1572x + 24.424$	0.97516
Sup	$y = 4.7566x + 23.826$	0.9828

Pontos relevantes a considerar após o aquecimento a 900 Watts:

- Novamente os pontos 4 e 5 obtiveram temperaturas mais elevadas, no entanto, os pontos 2 e 3 registaram temperaturas muito próximas das mais elevadas;
- O gráfico da Figura 5.11, aponta para o aquecimento mais elevado para profundidades superiores a 1 cm, uma vez que os pontos 1 e 6 atingiram temperaturas relativamente

mais baixas. No entanto também se verificou que a temperatura à superfície atingiu temperaturas elevadas.

Como conclusão pode-se realçar os seguintes fatores:

- Em todas as potências aplicadas, os pontos com temperaturas mais elevadas foram o 4, 5 e a temperatura à superfície do provete. Os pontos mencionados encontram-se por ordem decrescente de temperaturas verificadas;
- Remete-se assim para um aquecimento mais relevante na zona central do provete, quando comparado com os valores das extremidades;
- Aquecimento em estufa

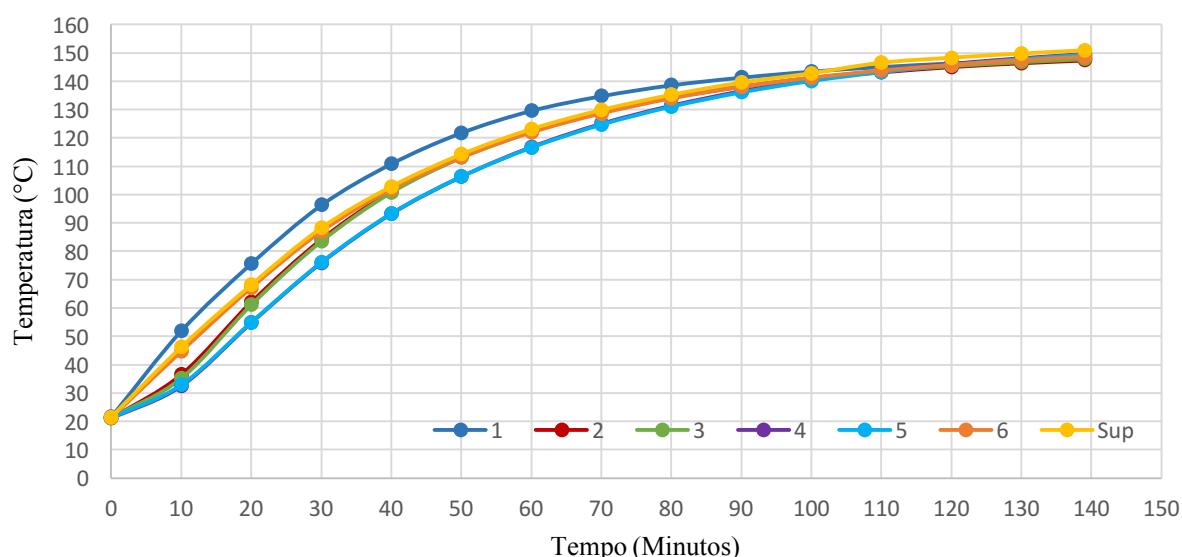


Figura 5.12 - Aquecimento em estufa do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm

Com os valores registados no aquecimento em estufa é possível afirmar que as temperaturas começam a se juntar após os 90 minutos de aquecimento, até lá, as que se encontram mais perto da superfície é que possuíram as temperaturas mais altas.

- Análise da evolução da temperatura à superfície através do termómetro Calex Soft

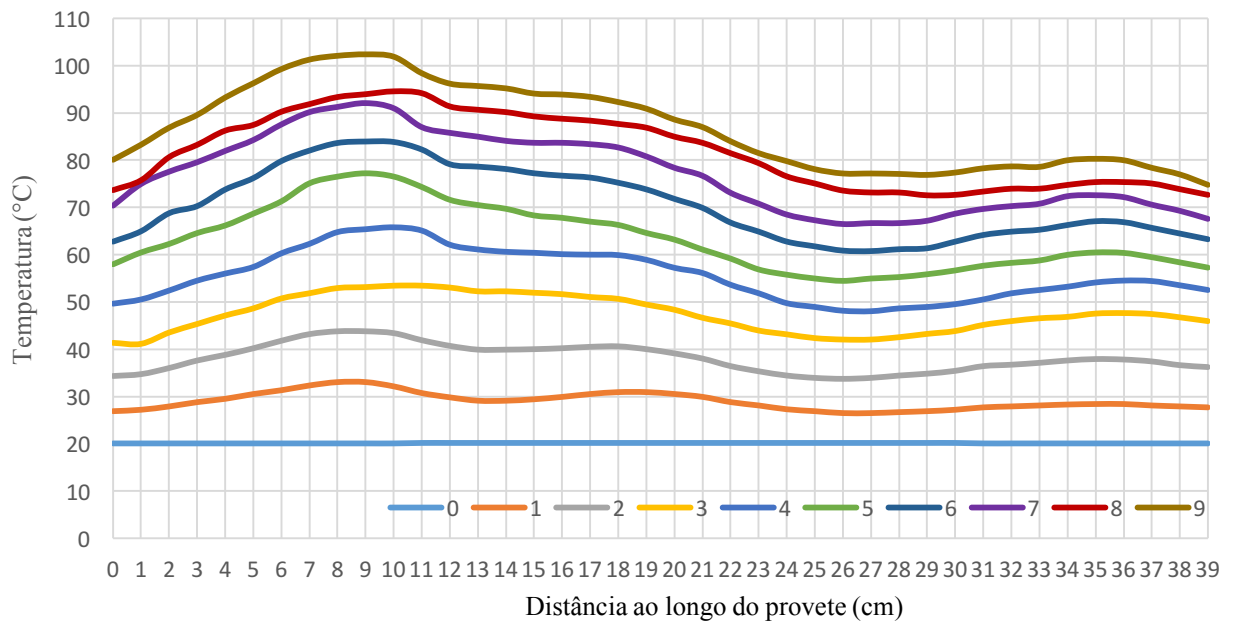


Figura 5.13 - Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

Verifica-se um pico de temperatura na zona mais próxima da fonte de energia, como pode ser comprovado através da análise da Figura 5.13. Na metade do provete mais afastada da fonte de energia do micro-ondas, não se verificam picos de temperatura, mas sim um aquecimento em que as linhas que registam as temperaturas se mantêm praticamente planas.

Influência da potência aplicada

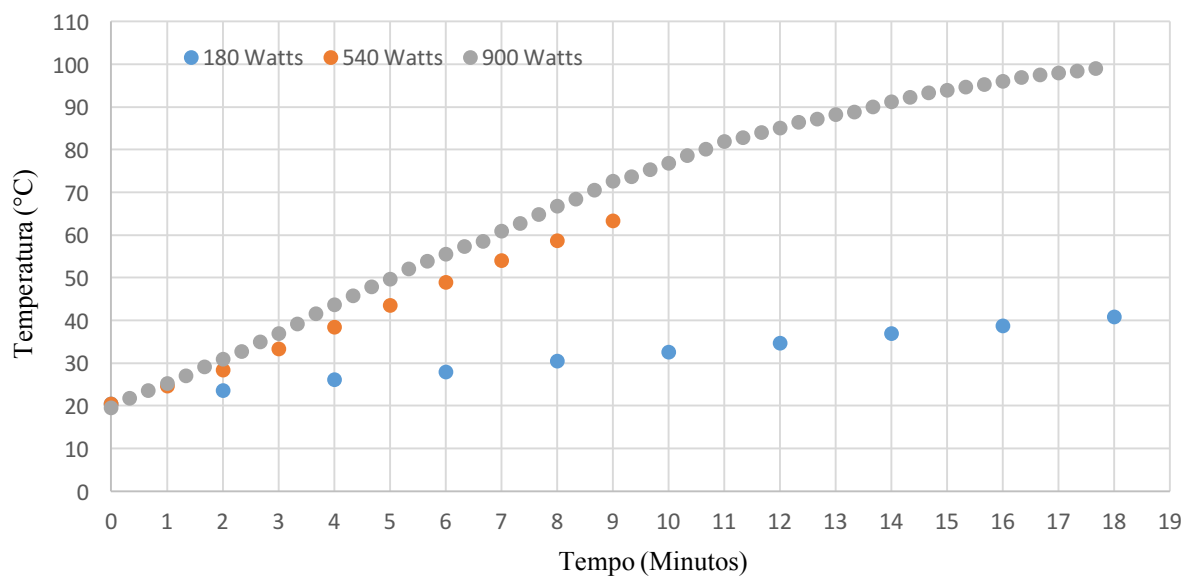


Figura 5.14 - Influência da potência do micro-ondas no aquecimento do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm

Tendo em atenção a influência da potência aplicada na análise da temperatura no ponto 5, situado na zona central a 2 cm de profundidade, comprova-se uma aproximação das temperaturas utilizando a potência média às temperaturas utilizando a potência máxima.

A diferença entre a potência mínima e a potência média são aproximadamente de 30 °C após 9 minutos de aquecimento, e a diferença entre a potência média e a potência máxima já se encontra na ordem dos 10 °C.

5.2.3. Proвете de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm

Na figura abaixo é possível ver o provete que foi submetido ao ensaio de aquecimento por radiação de micro-ondas.

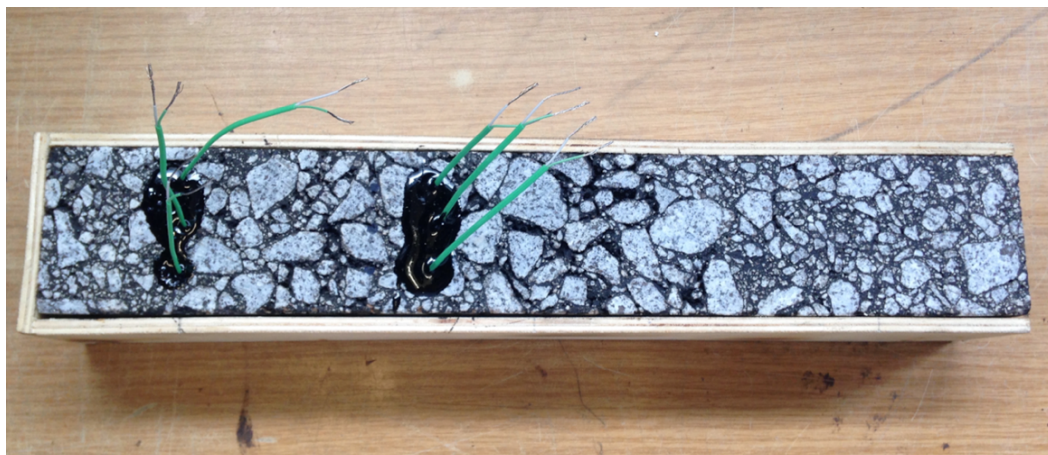


Figura 5.15 - Provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm

Prontamente são exibidos todos os gráficos relativos ao estudo efetuado sobre o Provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm.

▪ Potência de 180 Watts

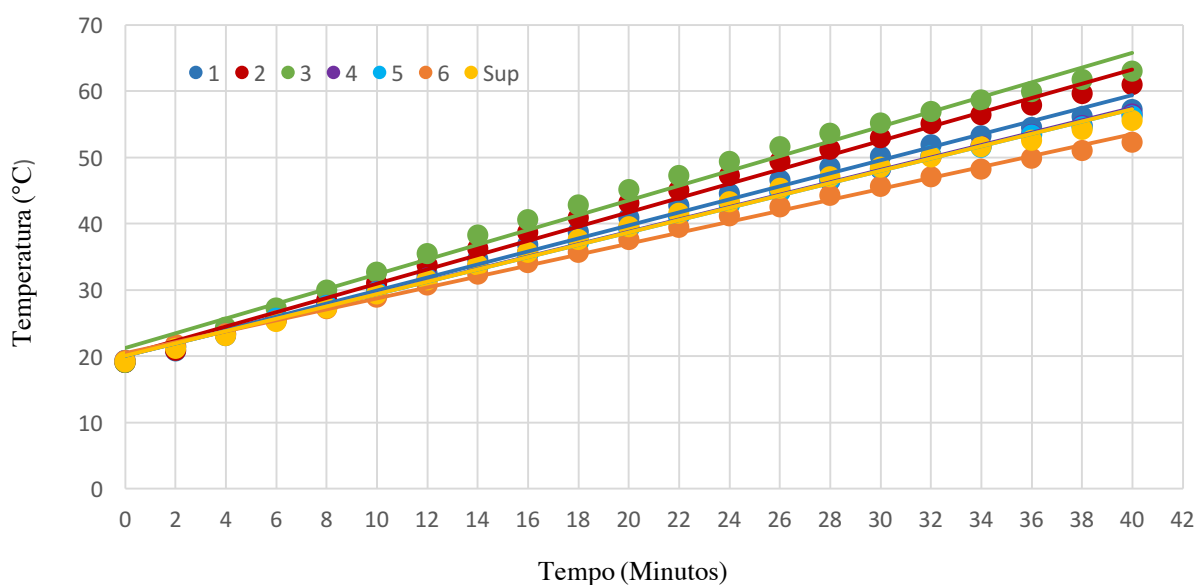


Figura 5.16 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts

Quadro 5.7 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.16

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 0.9812x + 20.109$	0.99365
2	$y = 1.0756x + 20.211$	0.9928
3	$y = 1.1147x + 21.202$	0.989
4	$y = 0.9324x + 20.123$	0.99818
5	$y = 0.9283x + 20.124$	0.99828
6	$y = 0.8244x + 20.513$	0.99654
Sup	$y = 0.9288x + 20.11$	0.99466

Elementos a retirar após aplicação da potência de 180 Watts no provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm:

- Os pontos que obtiveram temperaturas maiores foram o 3, situado a 3 cm de profundidade, seguido pelo ponto 2, a 2 cm de profundidade;
- Constatou-se um aquecimento superior na extremidade do provete, uma vez que a temperatura foi superior quando comparada com os pontos centrais do provete;
- Existe um pequeno intervalo de valores de temperaturas, entre a temperatura mais baixa e mais alta;
- No entanto, as temperaturas para cada ponto mantiveram um comportamento linear ao longo do aquecimento, comprovado no Quadro 4.7, na coluna do coeficiente de determinação.

■ Potência de 540 Watts

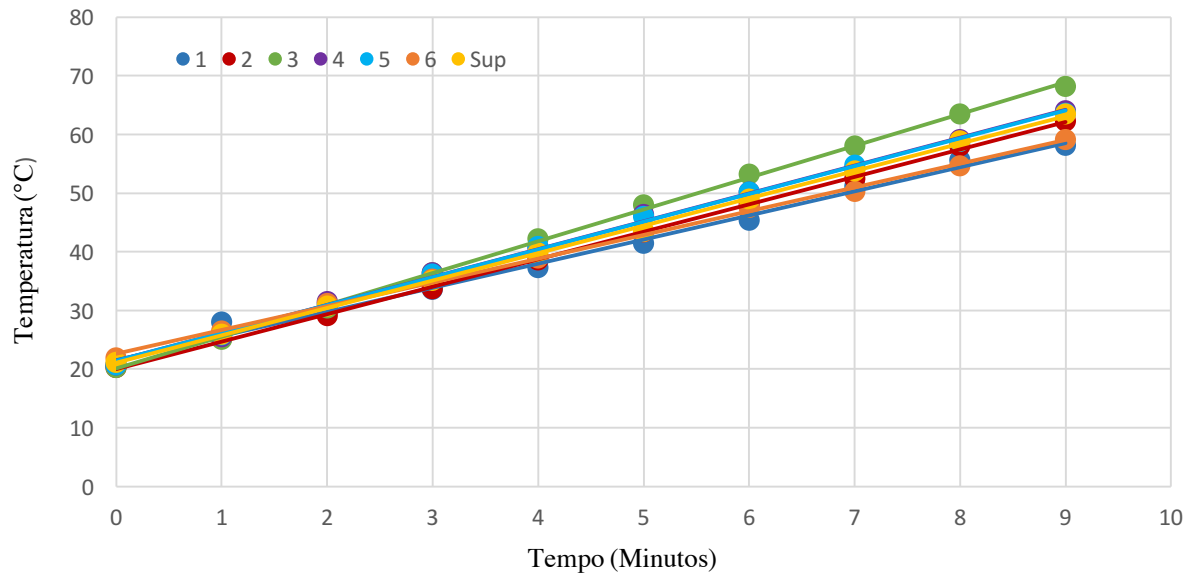


Figura 5.17 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts

Quadro 5.8 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.17

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 4.1103x + 21.544$	0.99228
2	$y = 4.6824x + 19.989$	0.99939
3	$y = 5.4188x + 20.085$	0.99913
4	$y = 4.7558x + 21.429$	0.99806
5	$y = 4.74x + 21.4$	0.9985
6	$y = 4.0588x + 22.565$	0.99812
Sup	$y = 4.6752x + 21.042$	0.99932

Pontos a considerar:

- O ponto que registou a temperatura maior, no mesmo intervalo de tempo foi o ponto 3, da extremidade, colocado a 3 cm;
- Os restantes pontos assumiram temperaturas relativamente juntas, com pequenos intervalos entre elas.

- Realça-se um comportamento linear das temperaturas com o passar do tempo, como se pode verificar no coeficiente de determinação de cada uma, presente no Quadro 4.8.

▪ Potência de 900 Watts

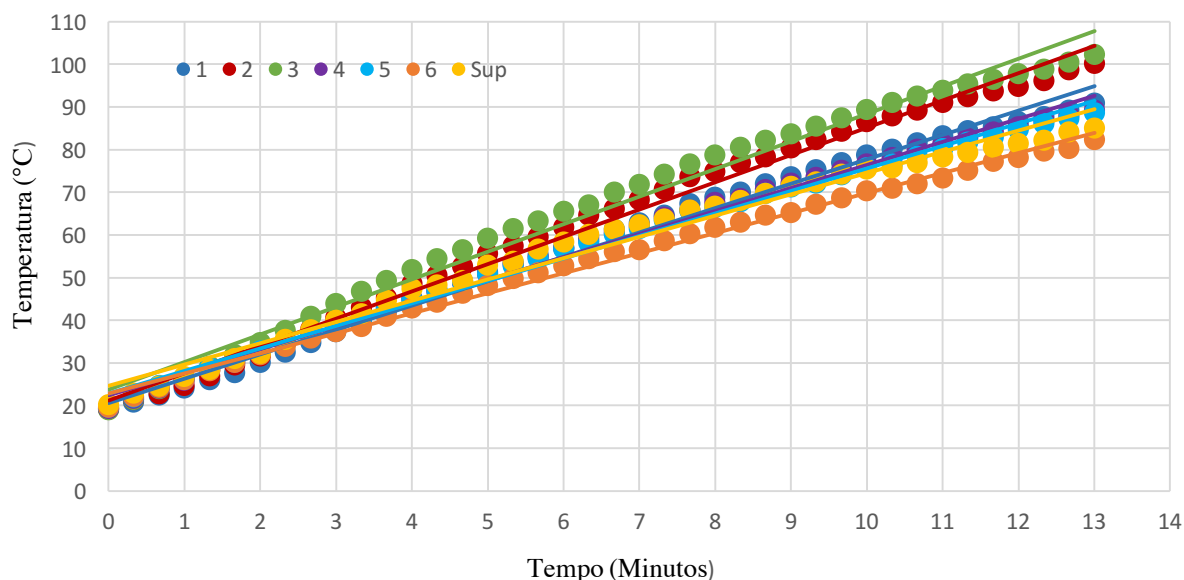


Figura 5.18 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts

Quadro 5.9 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.18

Ponto	Equação do gráfico	Coefficiente de determinação (R^2)
1	$y = 5.7133x + 20.664$	0.99164
2	$y = 6.4006x + 21.184$	0.99211
3	$y = 6.4674x + 23.73$	0.98661
4	$y = 5.4076x + 22.353$	0.99404
5	$y = 5.2718x + 22.818$	0.99436
6	$y = 4.6966x + 22.879$	0.99478
Sup	$y = 4.9835x + 24.722$	0.98198

Após o aquecimento do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm com uma potência de 900 Watts, é admissível dizer que:

- A zona da extremidade do provete revela temperaturas maiores do que o verificado na zona central;
- Comprovando o que se mencionou no ponto anterior, os pontos 2 e 3 alcançaram temperaturas mais elevadas, e neste caso por ordem crescente;
- A evolução das temperaturas rege-se por um comportamento linear, uma vez que o coeficiente de determinação de cada ponto está muito próximo de um;

Para conclusão, com o aquecimento do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm utilizando os três tipos de potências, pode-se mencionar os seguintes princípios:

- Comprova-se que em todas as potências aplicadas o ponto 3 assume-se como o ponto em que a temperatura foi mais alta;
- A evolução das temperaturas rege-se por um comportamento linear, de acordo com os valores do coeficiente de determinação de todos os pontos medidos.

▪ Aquecimento em estufa

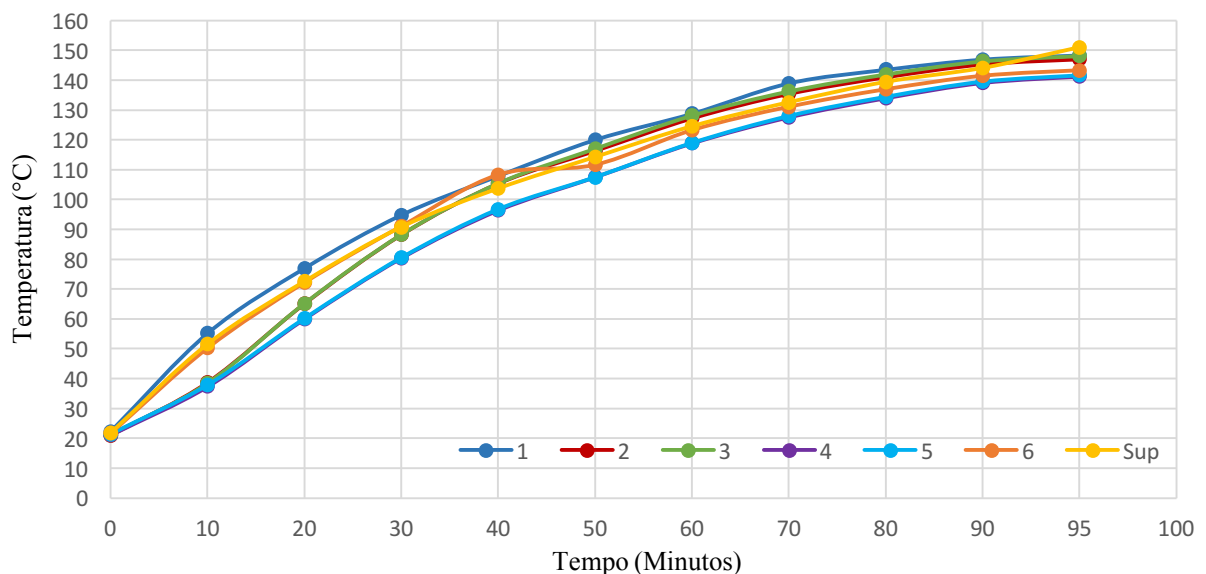


Figura 5.19 - Aquecimento em estufa do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm

Com a realização do aquecimento do provete de mistura betuminosa de agregado inferior a 20 mm, foi possível verificar que ao fim dos 95 minutos de aquecimento em estufa, os pontos que

registaram temperaturas mais baixas foram aquelas que se encontravam na zona central do provete.

No entanto, confirma-se a teoria em que o aquecimento era ligeiramente maior na zona extrema do provete, por indiferente que seja a técnica utilizada.

- Análise da evolução da temperatura à superfície através do termómetro Calex Soft

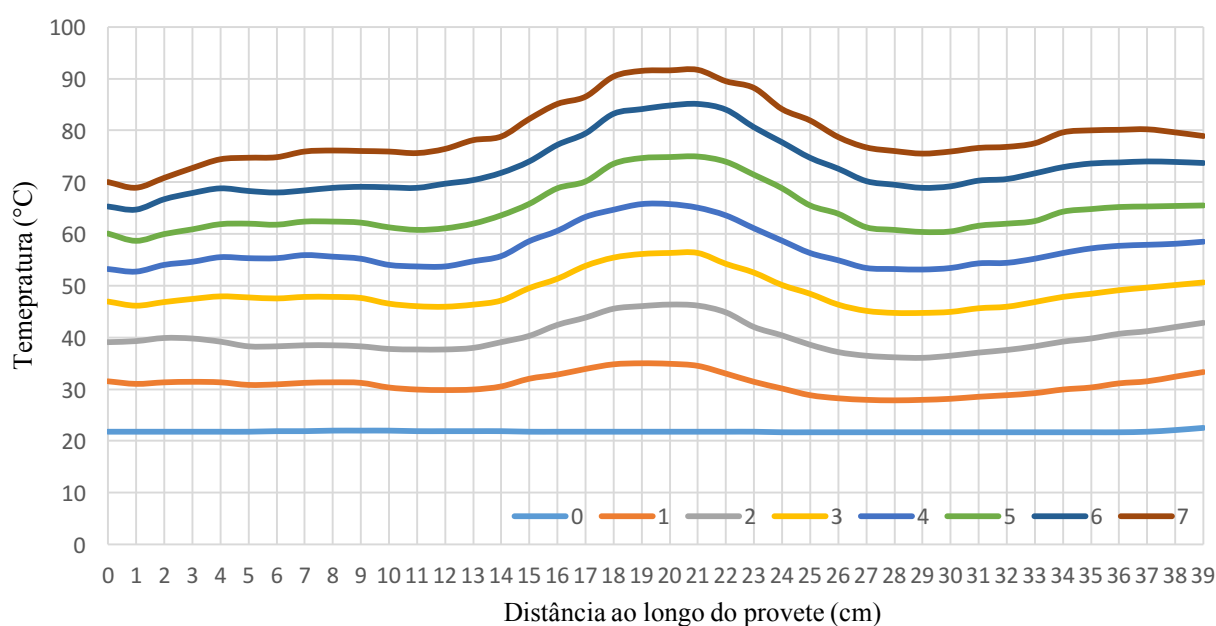


Figura 5.20 - Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

Pode-se verificar na figura acima que o aquecimento realizado através de radiação de micro-ondas a uma potência igual a 900 Watts, e verificando a evolução da temperatura à superfície com auxílio do termómetro Calex Soft, que a predominância do aquecimento se procede na zona central do provete, uma vez que é o local onde são registados os picos de temperatura no provete em estudo.

Influência da potência aplicada

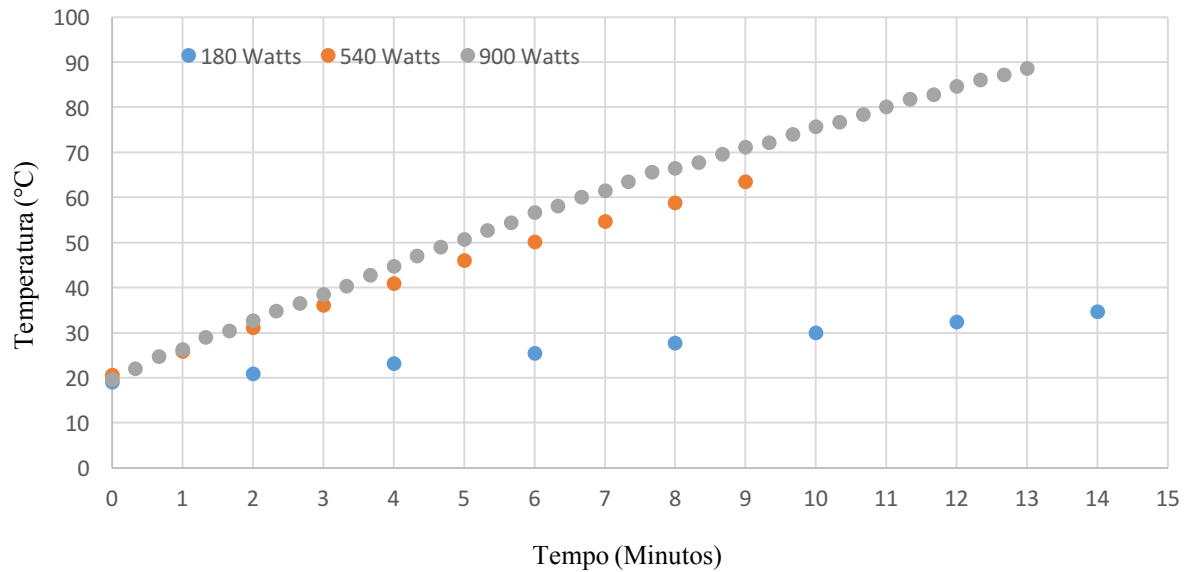


Figura 5.21 - Influência da potência do micro-ondas no aquecimento do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm

Relativamente à influência da potência de radiação de micro-ondas aplicada a este provete, pode-se dizer que existe uma grande diferença entre a potência mínima e as restantes utilizadas no estudo, pois como pode ser observado na Figura 5.21, existe um défice de temperatura de mais de 30 °C, após 9 minutos de radiação.

No que diz respeito à diferença entre a potência média e máxima, esta já não é tão elevada, uma vez que para os mesmos 9 minutos de radiação de micro-ondas, a diferença estabelece-se abaixo de 10 °C.

Fazendo comparação da evolução da temperatura do provete utilizando radiação de micro-ondas e aquecimento em estufa, é possível obter ganhos de cerca de 20 minutos quando são aplicadas micro-ondas, com objetivo de se atingir no mínimo 90 °C.

5.2.4. Provete de mistura betuminosa drenante

Para a realização deste estudo, utilizou-se uma amostra presente no laboratório de uma mistura betuminosa drenante, como se pode visualizar na Figura 5.22.



Figura 5.22 – Provete de mistura betuminosa drenante

- Potência de 180 Watts

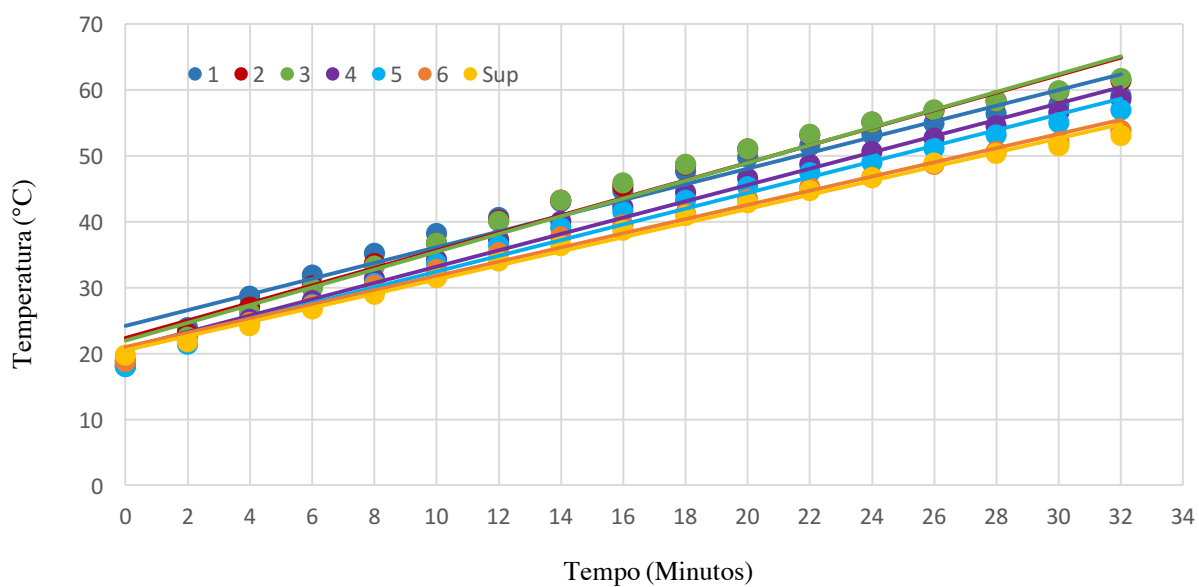


Figura 5.23 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa drenante através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts

Quadro 5.10 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.23

Ponto	Equação do gráfico	Coefficiente de determinação (R^2)
1	$y = 1.193x + 24.153$	0.96743
2	$y = 1.3293x + 22.355$	0.97762
3	$y = 1.3479x + 21.992$	0.97762
4	$y = 1.237x + 20.82$	0.98846
5	$y = 1.1925x + 20.531$	0.98799
6	$y = 1.0759x + 20.998$	0.98894
Sup	$y = 1.0717x + 20.529$	0.99396

Relativamente a este ponto é possível relatar o seguinte:

- Verificou-se um aquecimento superior, no mesmo intervalo de tempo, na zona extrema do provete, uma vez que os pontos presentes nessa zona alcançaram uma temperatura superior relativamente aos outros;
- No entanto, foi possível observar que à medida que se ia subindo no provete, até à superfície, a temperatura ia baixando. Facto que aconteceu da mesma forma tanto na zona dos cantos como na zona central;
- Embora no geral se mantenha um comportamento linear, algumas linhas de tendência não se encontravam tão próximas da unidade como outras.

▪ Potência de 540 Watts

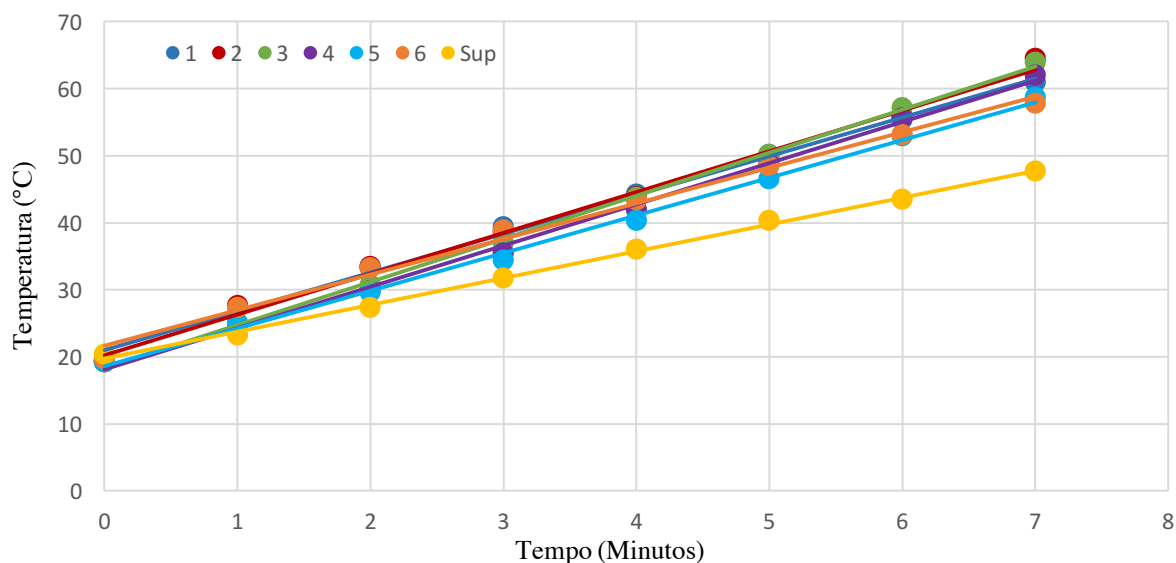


Figura 5.24 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa drenante através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts

Quadro 5.11 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.24

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 5.7917x + 20.967$	0.99634
2	$y = 6.0821x + 20.25$	0.99423
3	$y = 6.4131x + 18.367$	0.99868
4	$y = 6.1571x + 18.125$	0.99678
5	$y = 5.6238x + 18.617$	0.99743
6	$y = 5.306x + 21.642$	0.99333
Sup	$y = 3.9929x + 19.75$	0.99804

Quanto à potência de 540 Watts, pode-se enunciar os seguintes aspectos:

- Constatou-se um afastamento da linha de tendência da temperatura à superfície comparando com as linhas de tendências dos pontos no interior do provete, verificando-se que à superfície a temperatura foi inferior ao resto dos pontos;
- Manteve-se o mesmo comportamento de aquecimento, uma vez que nas zonas extremas o aquecimento foi superior;

- De referir também que o ponto colocado a maior profundidade obteve temperatura mais altas;
- Já se tornou possível verificar um comportamento linear de aquecimento, pois o coeficiente de determinação estava com valores superiores a 0,993.

- Potência de 900 Watts

Neste ponto realizaram-se duas experiências utilizando a potência do micro-ondas de 900 Watts. Isto é, uma até a mistura ter atingido o critério normal de paragem, os 100° C, e outra em que o objetivo era que a mistura alcançasse uma temperatura superior a 140 °C.

No primeiro caso a medição ocorreu de uma forma normal, através da introdução de sondas nos furos, já no segundo caso a medição foi realizada apenas com uma sonda, em que se verificava a evolução da temperatura de um furo de cada vez. No entanto, surgiram alguns problemas em realizar o segundo estudo na profundidade correta, uma vez que à medida que se ia aquecendo o provete e se ia introduzindo a sonda esta acabava aos poucos por ir até uma profundidade maior, pois com o passar do tempo o betume ficava mais mole.

Posto isto, acabou-se por limitar o aquecimento até perto dos 140 °C.

De seguida, apresenta-se o gráfico da primeira medição, nomeadamente a evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa drenante através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts.

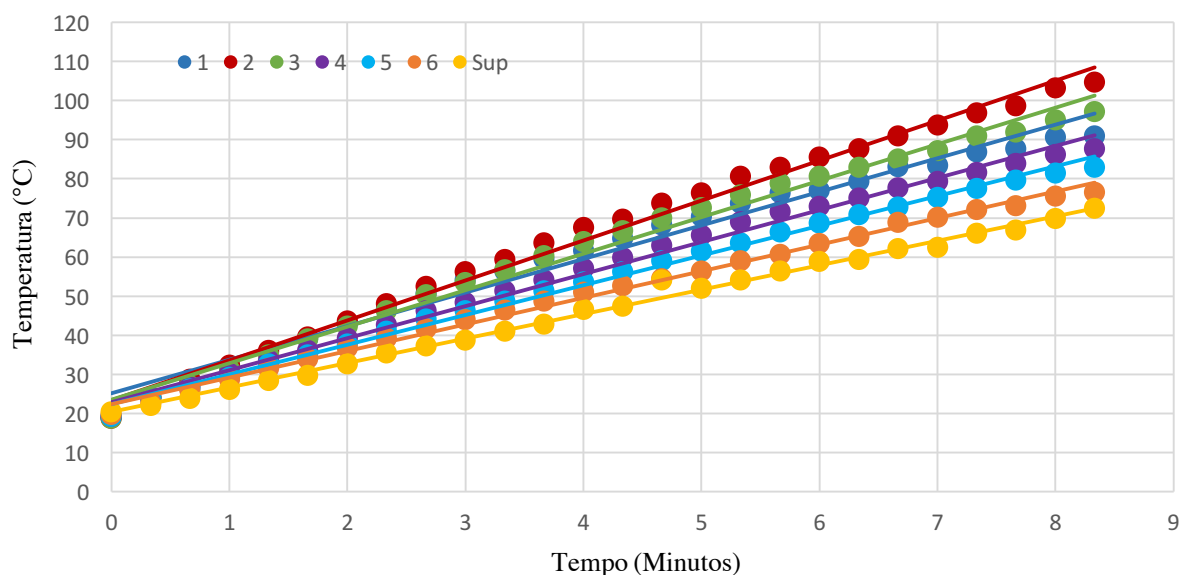


Figura 5.25 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa drenante através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts

Quadro 5.12 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.25

Ponto	Equação do gráfico	Coefficiente de determinação (R^2)
1	$y = 8.5697x + 25.204$	0.98386
2	$y = 10.216x + 23.421$	0.99286
3	$y = 9.3277x + 23.577$	0.9898
4	$y = 8.197x + 22.888$	0.99678
5	$y = 7.5821x + 22.458$	0.99601
6	$y = 6.7839x + 22.453$	0.99535
Sup	$y = 6.259x + 20.363$	0.99494

Quanto a este procedimento pode-se referir os seguintes pontos:

- Apesar de existir um pequeno intervalo entre as linhas de tendência de cada ponto, como se pode comprovar na coluna do coeficiente de determinação, estas seguiram um comportamento linear;
- O aquecimento surgiu da mesma forma, isto é, das pontas para o meio e do interior para o exterior do provete. No entanto, é importante referir que o ponto que alcançou uma temperatura maior foi o ponto 2, situado a 2 cm de profundidade. Este pormenor não se

tinha verificado até então, uma vez que o ponto 3 era o ponto em que era possível verificar uma temperatura maior.

Na Figura 5.26 apresenta-se o gráfico relativo ao aquecimento de um provete de mistura betuminosa drenante através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts até aos 140 °C.

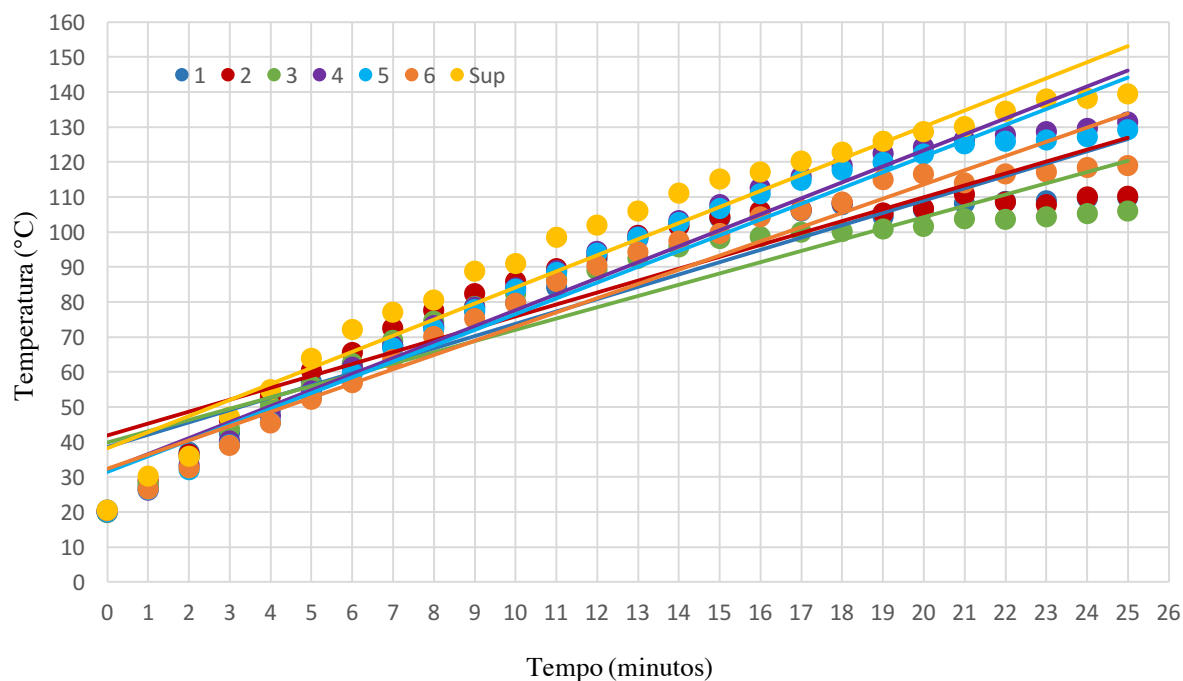


Figura 5.26 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa drenante através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts até aos 140 °C

Quadro 5.13 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.26

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 3.5213x + 38.479$	0.88399
2	$y = 3.4012x + 41.892$	0.85848
3	$y = 3.2196x + 39.913$	0.86899
4	$y = 4.5671x + 31.969$	0.95888
5	$y = 4.5066x + 31.479$	0.95516
6	$y = 4.06x + 32.423$	0.94524
Sup	$y = 4.592x + 38.246$	0.9485

Para finalizar os estudos com este tipo de provete, foi permitido apurar os seguintes fatores:

- Tal como foi dito anteriormente notou-se alguns problemas na execução deste ensaio. Fator que comprova a dificuldade sentida pode ser analisada nos valores do coeficiente de determinação obtidos, pois estes encontraram-se ligeiramente afastados da unidade, como se pode observar no Quadro 5.13;
- No entanto, no gráfico da Figura 5.26 vê-se que os valores da temperatura verificada à superfície se encontram sempre acima dos valores dos pontos internos do provete ao longo de todo o aquecimento;
- Também se pode realçar que neste ensaio a parte central do provete aqueceu mais que a zona da ponta do provete.

Em termos de conclusão no estudo deste tipo de provete pode-se dizer o seguinte:

- Com exceção ao último estudo foi possível verificar um aquecimento superior na extremidade do provete;
- O aquecimento de forma decrescente da zona interior para o exterior, excetuando o último estudo;
- Salvo alguns pontos em determinadas potências e sem contabilizar o último estudo, pode-se dizer que em parte o aquecimento seguiu um comportamento linear.

▪ Aquecimento em estufa

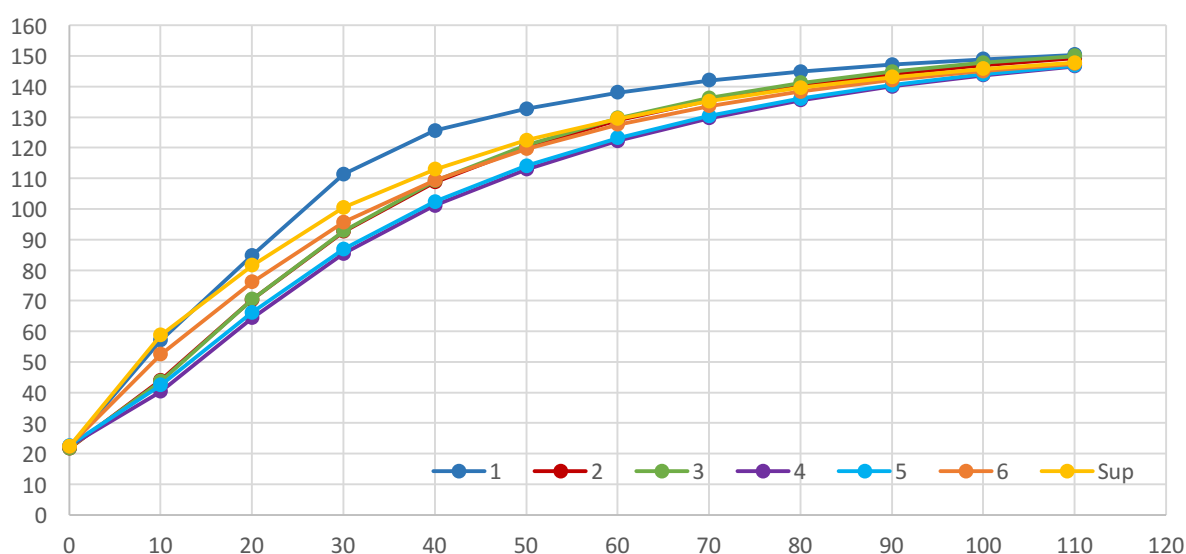


Figura 5.27 - Aquecimento em estufa do provete de mistura betuminosa drenante

De acordo com o gráfico da Figura 5.27, o aquecimento nos pontos do provete em estudo segue a mesma tendência de aumento de temperatura, apenas com um pequeno desvio, sensivelmente ao meio do estudo, do ponto 1, situado a 1 cm de profundidade, na parte extrema do provete.

Ao fim de 110 minutos de aquecimento em estufa todos os pontos que foram analisados verificaram praticamente a mesma temperatura, não havendo grandes intervalos entre eles.

Influência da potência aplicada

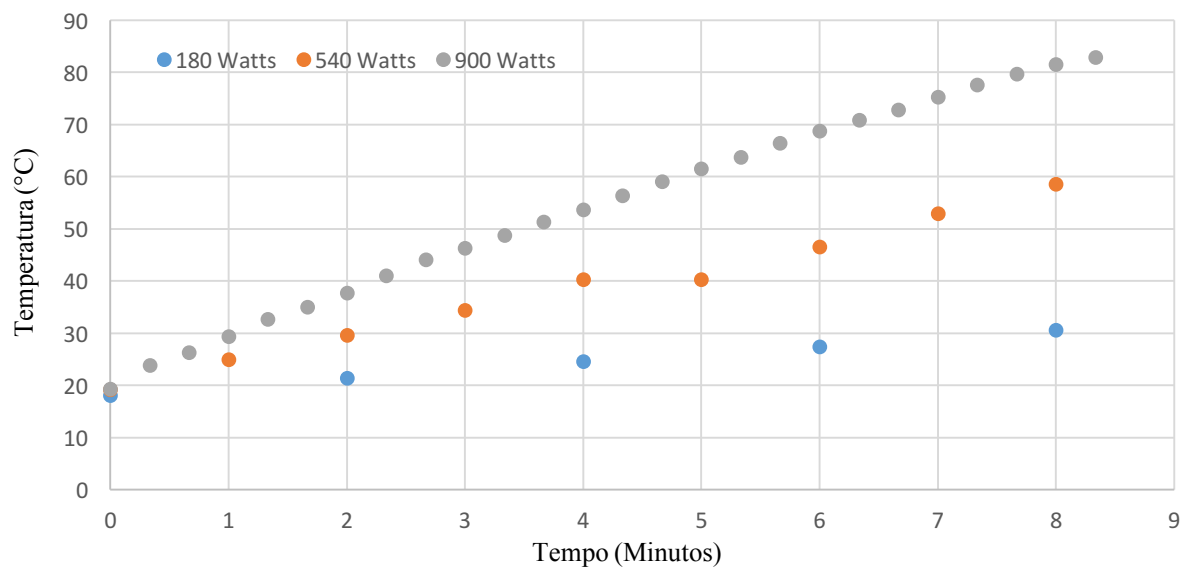


Figura 5.28 - Influência da potência do micro-ondas no aquecimento do provete de mistura betuminosa drenante

Através da análise do gráfico da Figura 5.28, é permitido verificar que para o mesmo intervalo de tempo de aquecimento, aplicando micro-ondas ao provete em estudo, a temperatura aumentou cerca de 20 °C à medida que se ia aumentando a potência.

Fazendo comparação entre aquecimento em estufa, presente na Figura 5.27, e aquecimento por radiação de micro-ondas com 900 Watts de potência, demonstrado na Figura 5.28, do tempo necessário para que o ponto 5 atingisse mais ou menos 85 °C, é viável mencionar que o aquecimento por radiação de micro-ondas foi mais rápido cerca de 22 minutos que o tempo verificado em estufa.

5.2.5. Provete de mistura betuminosa modificada com borracha proveniente de pneus usados

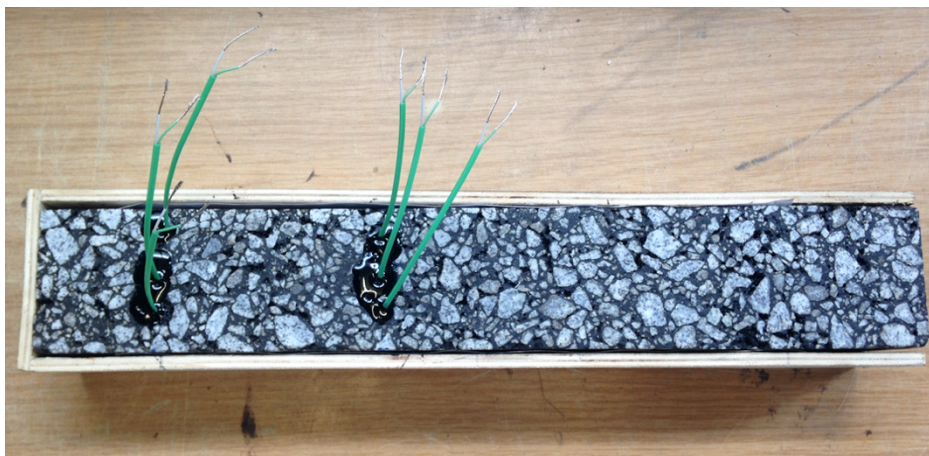


Figura 5.29 - Provete de mistura betuminosa modificada com borracha proveniente de pneus usados

Apresenta-se de seguida os valores registados durante o estudo deste provete.

- Potência de 180 Watts

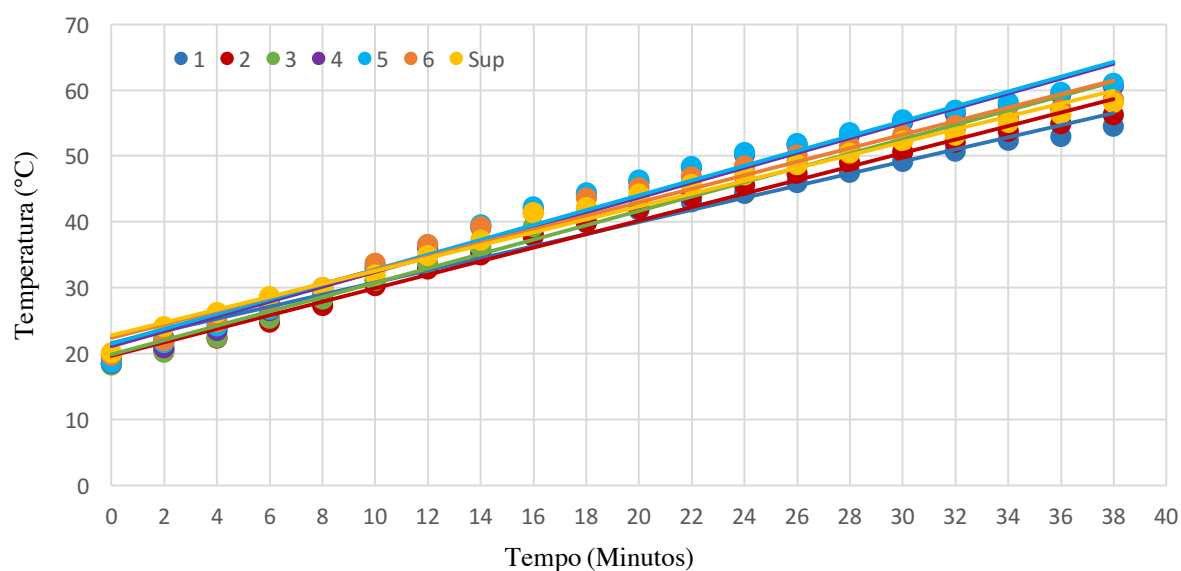


Figura 5.30 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa modificada com borracha através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts

Quadro 5.14 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.30

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 0.9167x + 21.637$	0.98741
2	$y = 1.0247x + 19.73$	0.98839
3	$y = 1.0901x + 19.839$	0.98564
4	$y = 1.1286x + 21.127$	0.97738
5	$y = 1.1264x + 21.519$	0.97824
6	$y = 1.0273x + 22.396$	0.97478
Sup	$y = 0.9742x + 22.84$	0.98619

Sobre o uso desta potência neste provete, torna-se viável mencionar os seguintes pormenores:

- Está-se perante um aquecimento maior na zona central do provete;
- O ponto em que o aquecimento foi mais alto foi o 5, o qual foi colocado a 2 cm de profundidade;
- Foi revelado um aquecimento maior nos pontos colocados a 2 e 3 cm de profundidade do que aqueles colocados a 1 cm da superfície.

▪ Potência de 540 Watts

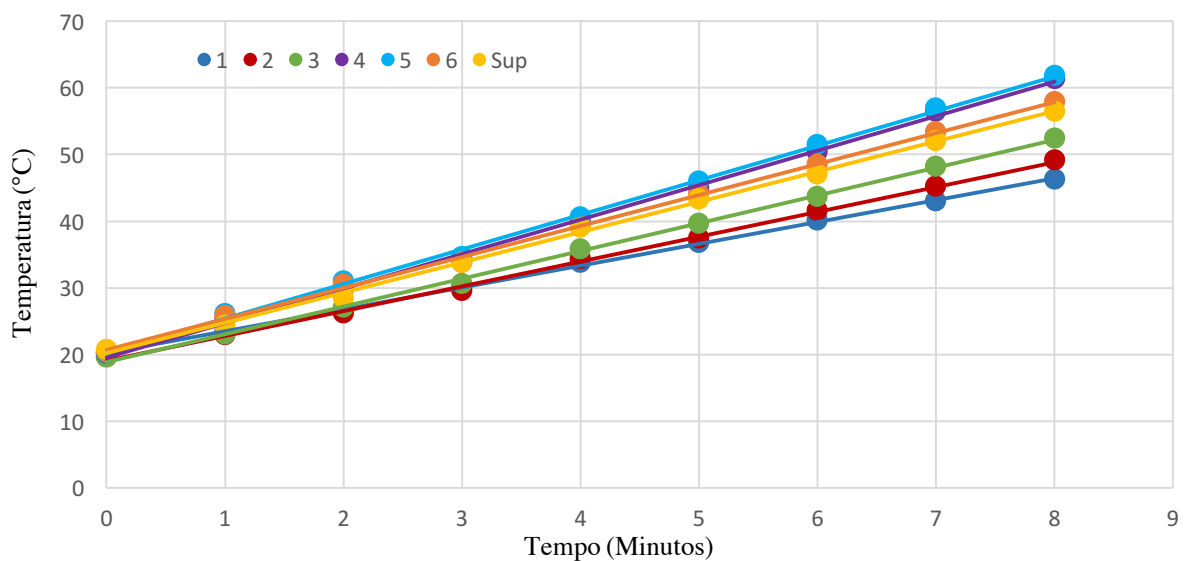


Figura 5.31 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa modificada com borraça através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts

Quadro 5.15 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.31

Ponto	Equação do gráfico	Coefficiente de determinação (R^2)
1	$y = 3.27x + 20.276$	0.99936
2	$y = 3.7167x + 19.111$	0.99841
3	$y = 4.1533x + 18.931$	0.99872
4	$y = 5.1783x + 19.542$	0.99859
5	$y = 5.1833x + 20.222$	0.99855
6	$y = 4.65x + 20.678$	0.99899
Sup	$y = 4.535x + 20.204$	0.99858

Quanto a este processo, pode-se dizer o seguinte:

- O aquecimento rege-se por um comportamento linear segundo os valores do coeficiente de determinação presentes no Quadro 5.15;
- Verifica-se valores da temperatura maiores na zona central do provete em estudo;
- Mais uma vez é o ponto 5, a 2 cm da superfície que regista valores mais altos;
- Nota-se um aquecimento superior nos pontos mais fundos do provete, quando comparado com o que se encontra mais próximo da superfície.

▪ Potência de 900 Watts

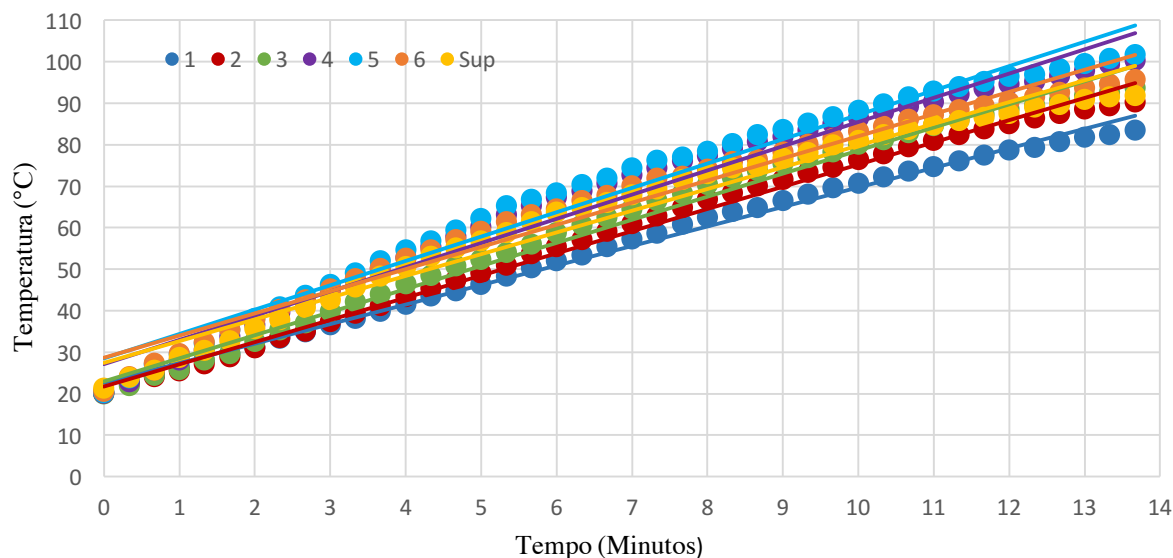


Figura 5.32 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa modificada com borracha através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts

Quadro 5.16 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.32

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 4.7112x + 22.633$	0.99513
2	$y = 5.3458x + 21.725$	0.99434
3	$y = 5.5657x + 22.999$	0.99014
4	$y = 5.8304x + 27.188$	0.97501
5	$y = 5.8761x + 28.453$	0.97442
6	$y = 5.3447x + 28.606$	0.97634
Sup	$y = 5.2393x + 27.348$	0.97421

Após a apresentação dos resultados obtidos para a potência de 900 Watts, concluiu-se que:

- Novamente foi possível verificar um aquecimento maior na zona central do provete;
- Os pontos em que as temperaturas foram mais altas, quer na potência mais baixa quer na média, mantiveram-se quando foi aplicada a potência mais elevada;

- No entanto reparou-se que os valores do coeficiente de determinação dos pontos situados na zona central do provete encontravam-se ligeiramente afastados da unidade, fator que não aconteceu nos pontos da zona externa do provete.

Como conclusão pode-se dizer o seguinte:

- Para todos os casos o aquecimento na zona central foi superior ao registado na parte extrema do provete;
- A ordem das temperaturas registadas em cada ponto manteve-se a mesma para todas as potências aplicadas;

▪ Aquecimento em estufa

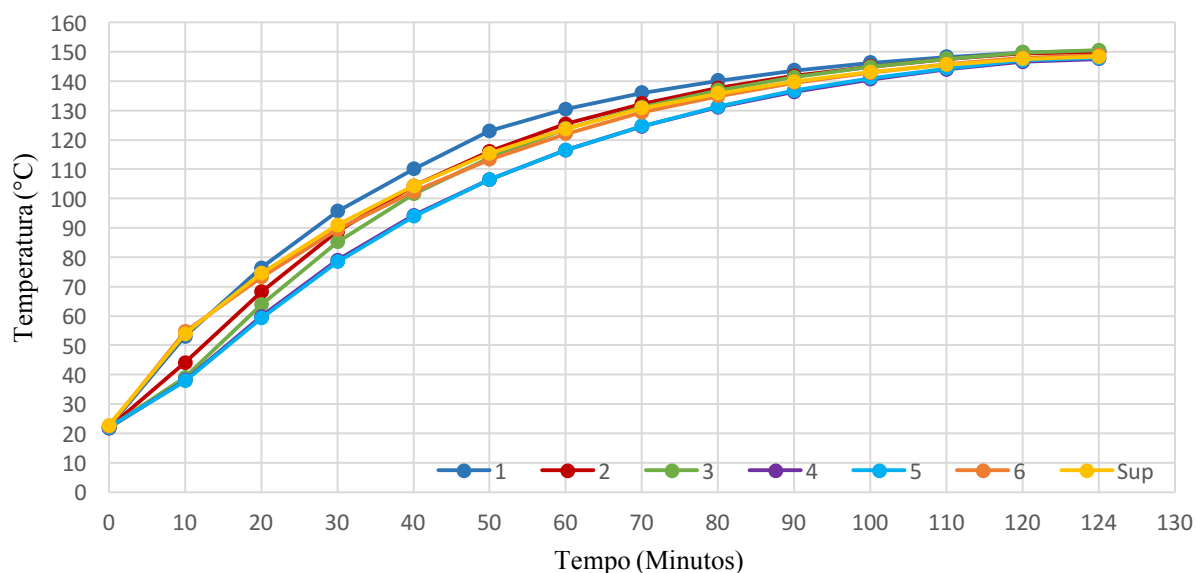


Figura 5.33 - Aquecimento em estufa do provete de mistura betuminosa modificada com borracha

Pode-se verificar uma evolução gradual em todos os pontos em estudo, uma vez que as linhas do gráfico se mantêm perto umas das outras.

Os pontos situados a meio do provete, e a uma profundidade maior que 2 cm, até aos 100 minutos de estudo registaram das temperaturas mais baixas, no entanto, acabaram por se aproximarem dos valores dos outros pontos já na parte final do estudo experimental.

Influência da potência aplicada

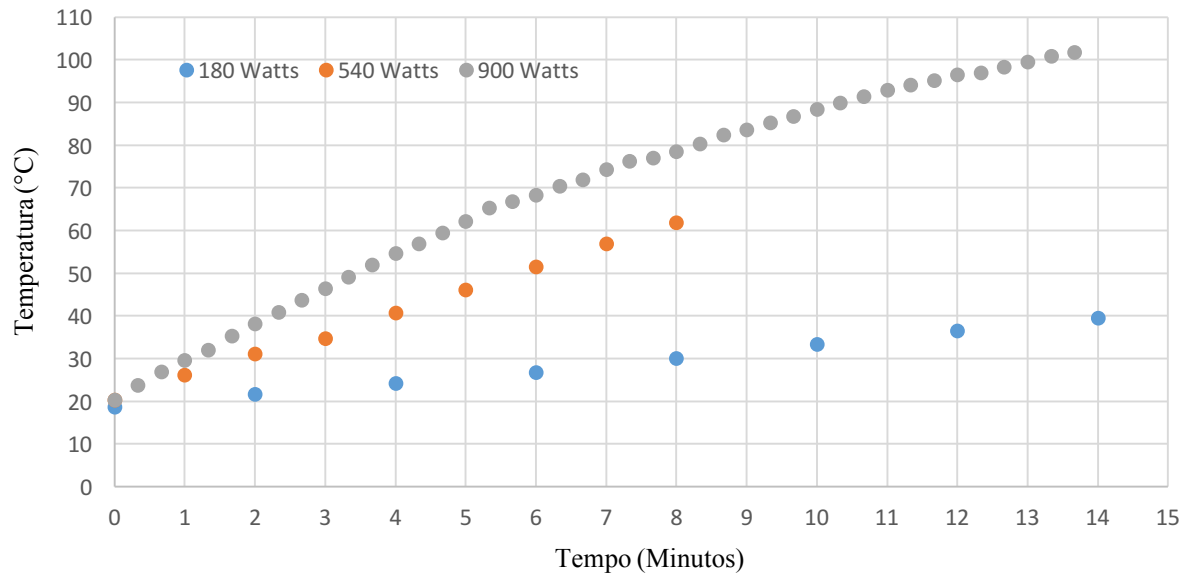


Figura 5.34 - Influência da potência do micro-ondas no aquecimento do provete de mistura betuminosa modificada com borracha

A influência da potência no aquecimento do provete de mistura betuminosa modificada com borracha foi bastante semelhante ao registado no provete de mistura betuminosa drenante, uma vez que os intervalos de temperatura de cada potência apontam para valores semelhantes.

Utilizando a técnica de aquecimento através de radiação de micro-ondas é permitido um ganho de cerca de 20 minutos no tempo necessário para serem atingidos 100 °C.

5.2.6. Provete de mistura betuminosa com 17% de vazios



Figura 5.35 – Provete de mistura betuminosa com 17% de vazios

Nos pontos que se seguem apresenta-se os valores obtidos aquando o provete em questão foi submetido a aquecimento.

- Potência de 180 Watts

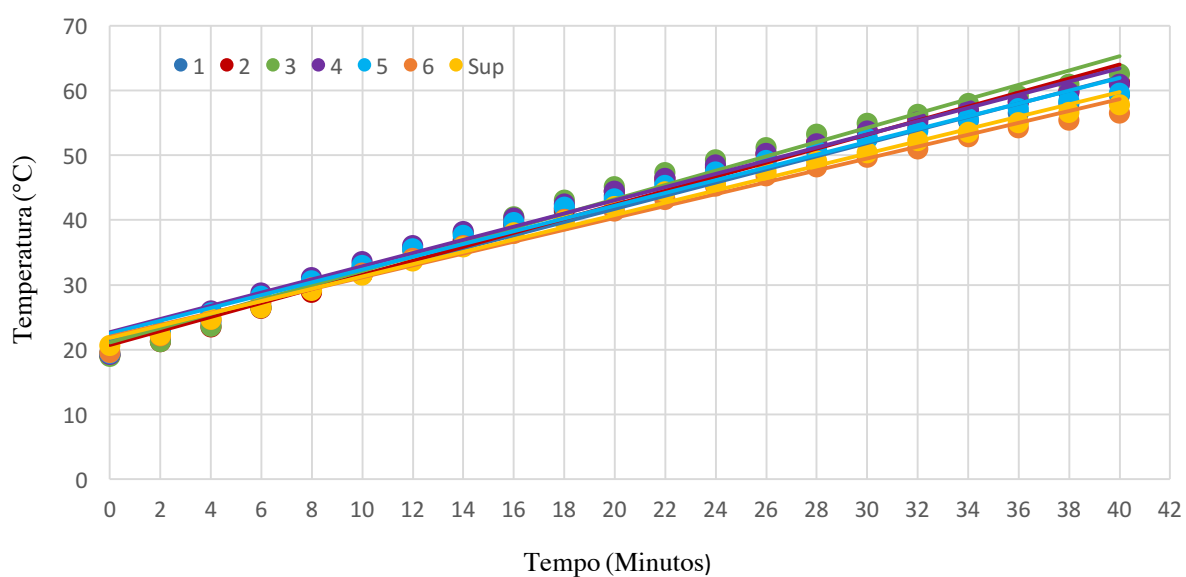


Figura 5.36 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com 17% de vazios através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts

Quadro 5.17 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.36

Ponto	Equação do gráfico	Coefficiente de determinação (R^2)
1	$y = 1.0161x + 21.387$	0.98684
2	$y = 1.0812x + 20.729$	0.98866
3	$y = 1.1062x + 21.085$	0.98581
4	$y = 1.0202x + 22.663$	0.98725
5	$y = 0.9855x + 22.537$	0.98807
6	$y = 0.9155x + 22.037$	0.98855
Sup	$y = 0.9499x + 21.769$	0.99216

Após o aquecimento do provete à potência de 180 Watts, pode-se enunciar o seguinte:

- Através da análise do gráfico da Figura 5.36, é possível ver que o ponto que obteve uma temperatura superior foi o ponto 3, situado a 3 cm de profundidade e na parte extrema do provete;
- Também se pode relatar que os pontos que apresentam as temperaturas mais elevadas são aqueles situados a mais de 2 cm de profundidade;
- De acordo com o coeficiente de determinação dos pontos em estudo, de possível visualização no Quadro 5.17, é viável de se dizer que o aquecimento seguiu um comportamento linear, uma vez que este se revela com valores muito próximos de 0,99.

▪ Potência de 540 Watts

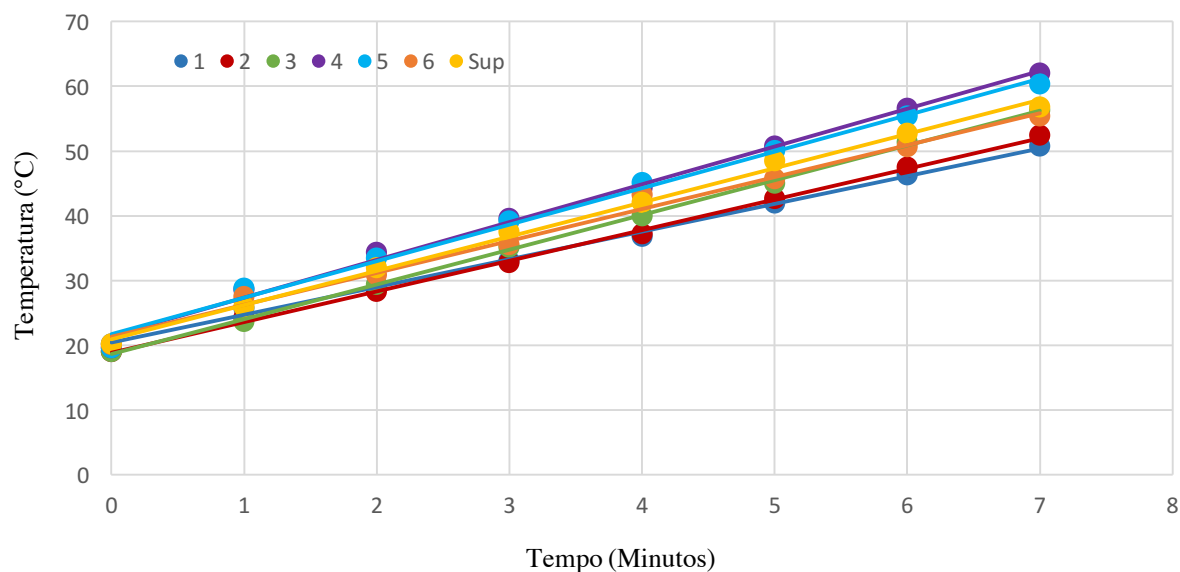


Figura 5.37 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com 17% de vazios através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts

Quadro 5.18 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.37

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 4.2774x + 20.467$	0.99765
2	$y = 4.7286x + 18.925$	0.99889
3	$y = 5.3631x + 18.667$	0.99925
4	$y = 5.8369x + 21.508$	0.99503
5	$y = 5.6393x + 21.725$	0.99371
6	$y = 4.9405x + 21.308$	0.99171
Sup	$y = 5.2798x + 20.933$	0.99668

No seguimento da utilização da potência de 540 Watts no provete de mistura betuminosa com 17% de vazios, é possível expor os seguintes fatores:

- O aquecimento neste caso já foi maior na zona central do provete, uma vez que são os pontos presentes nessa zona que apresentaram valores mais altos;
- O ponto 4, posicionado a 3 cm de profundidade foi aquele que teve temperaturas mais elevadas no mesmo intervalo de tempo, seguido do ponto 5 a 2 cm da superfície;

- Através dos valores obtidos ao longo do ensaio, com a colocação da linha de tendência e com o coeficiente de determinação, presente no Quadro 5.18, é possível observar que o aquecimento seguiu um comportamento linear, com valores muito próximos de um.

▪ Potência de 900 Watts

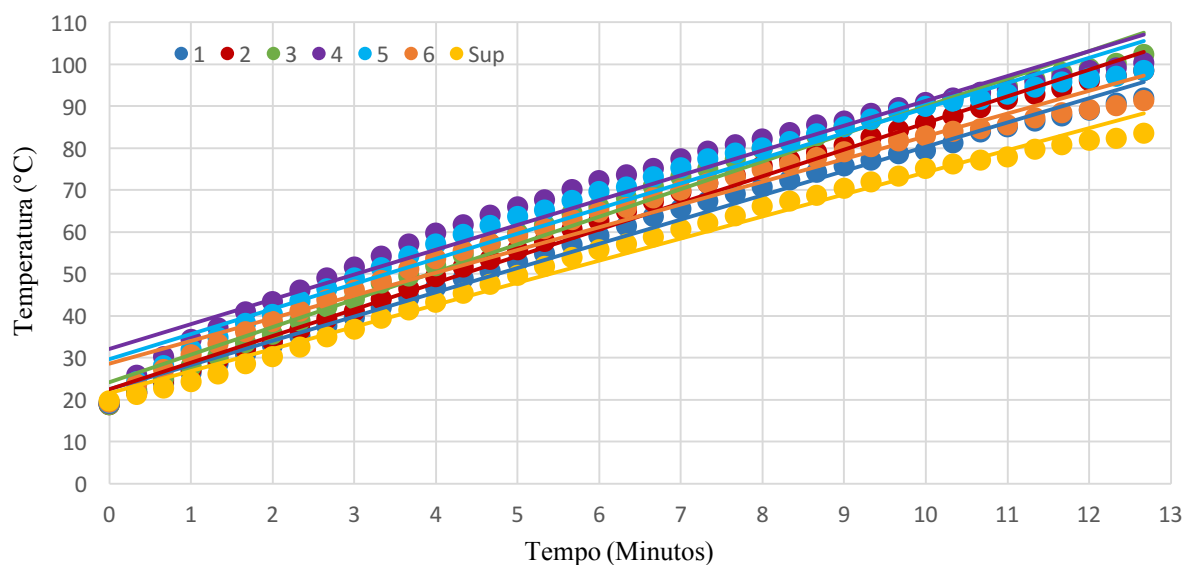


Figura 5.38 - Evolução da temperatura do provete de mistura betuminosa com 17% de vazios através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts

Quadro 5.19 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.38

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 5.7858x + 22.444$	0.99264
2	$y = 6.346x + 22.56$	0.99355
3	$y = 6.575x + 24.187$	0.98873
4	$y = 5.9114x + 32.143$	0.96575
5	$y = 5.9879x + 29.661$	0.97236
6	$y = 5.4196x + 28.668$	0.97231
Sup	$y = 5.2719x + 20.933$	0.9899

Com o uso da potência mais alta verificou-se o seguinte:

- Existiram alguns intervalos significativos entre os valores das temperaturas obtidas para cada ponto;
- No entanto, os pontos que tiveram temperaturas mais altas foram os colocados a 3 cm de profundidade, seguidos daqueles que estavam a 2 cm de profundidade;
- Através dos valores do coeficiente de determinação presentes no Quadro 5.19, nota-se que houve um ligeiro afastamento dos valores à linha de tendência de cada um;
- De realçar que a temperatura à superfície registou valores mais baixos, fazendo com que a tese de que o aquecimento é superior no interior de uma amostra prevaleça.

A conclusão sobre o provete de mistura betuminosa com uma percentagem de vazios de 17 % após a aplicação das três potências revelou-se um pouco difícil de relatar, uma vez que os valores obtidos se revelaram com poucos pontos em comum. Isto é, numa potência obteve-se um aquecimento superior na zona extrema e noutra já aconteceu mais na zona central, revelando-se como um fator de duvida de que zona se poderia obter um aquecimento superior.

No entanto, é presumível dizer que as temperaturas mais altas foram obtidas nos pontos presentes no interior do provete a profundidades superiores a 1 cm, para todas as potências utilizadas.

- Aquecimento em estufa

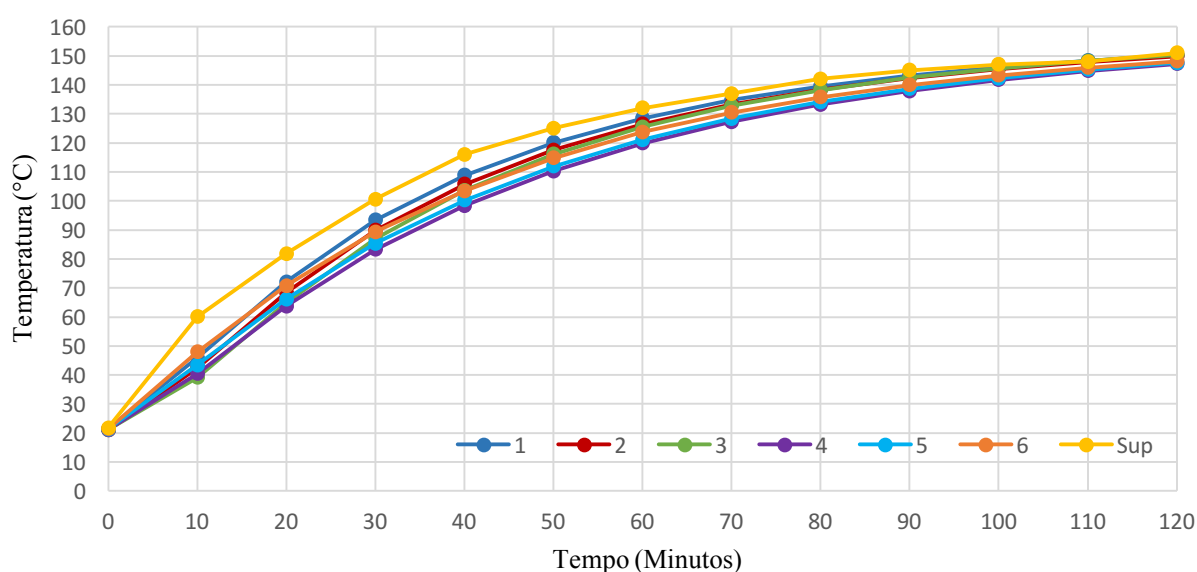


Figura 5.39 - Aquecimento em estufa do provete de mistura betuminosa com 17% de vazios

Com a observação da evolução das temperaturas presentes na Figura 5.39, verificou-se um ligeiro afastamento da linha que representa a temperatura à superfície, nos momentos iniciais em relação às restantes. No entanto, perto do fim deste ensaio as linhas acabam por se alinhar todas, atingindo praticamente a mesma temperatura.

Influência da potência aplicada

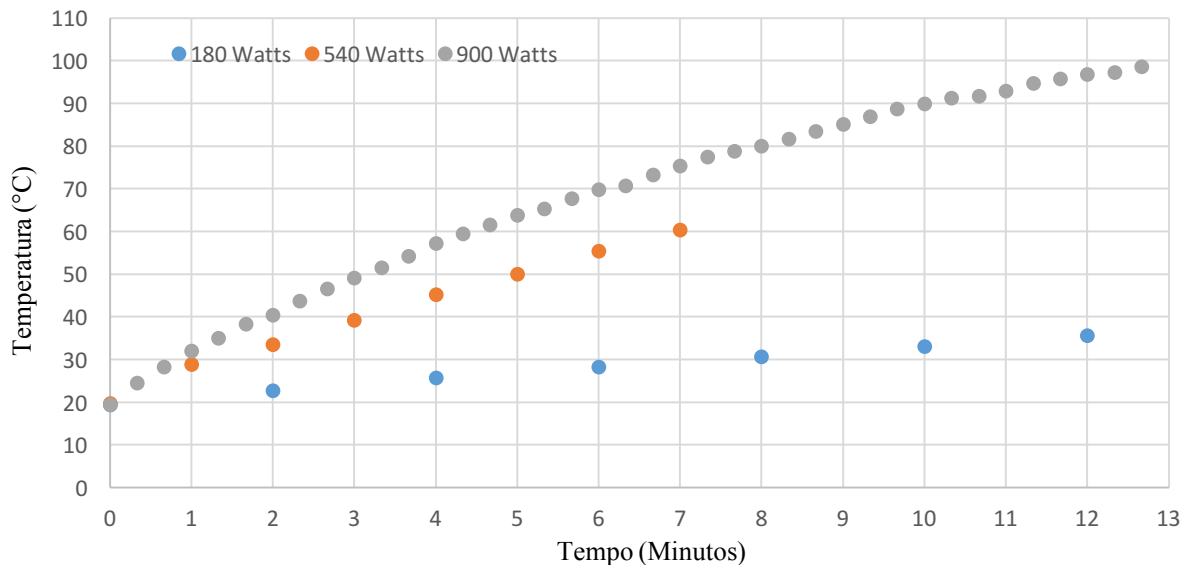


Figura 5.40 - Influência da potência do micro-ondas no aquecimento do provete de mistura betuminosa com 17% de vazios

Tal e qual pode ser visto na Figura 5.40, a diferença entre a potência mínima e média são cerca de 30 °C, e a diferença entre a potência média e máxima são de quase 20 °C. Estas diferenças são as registadas após 7 minutos de aquecimento para todas as potências.

Comparando a evolução relativa à potência de 900 Watts com a registada no aquecimento em estufa, para o ponto 5, é possível dizer que no aquecimento por micro-ondas consegue-se atingir pouco mais de 25 minutos mais rápido os 100 °C.

5.3. Calcário

O calcário trata-se da rocha sedimentar química existente mais comum. Composta principalmente pelo mineral calcite, pode ser formada por processos tanto inorgânicos como

orgânicos, sendo que os orgânicos são os mais usuais. O calcário pode surgir formando-se por precipitação química ou por processo biogénico (Miranda, 2012).

Em Portugal os calcários mais duros são geralmente aplicados na construção de alvenarias, cantarias, pavimentação e como inertes. No entanto é uma rocha que fratura por influência da compressão provocada pelo aumento do volume de água quando gela (Miranda, 2012).

Na figura seguinte é possível avistar o provete de calcário que foi submetida ao aquecimento com micro-ondas.



Figura 5.41 - Provete de calcário

Nas seguintes figuras são apresentados os gráficos elaborados através dos resultados de cada medição para cada potência aplicada.

- Potência de 180 Watts

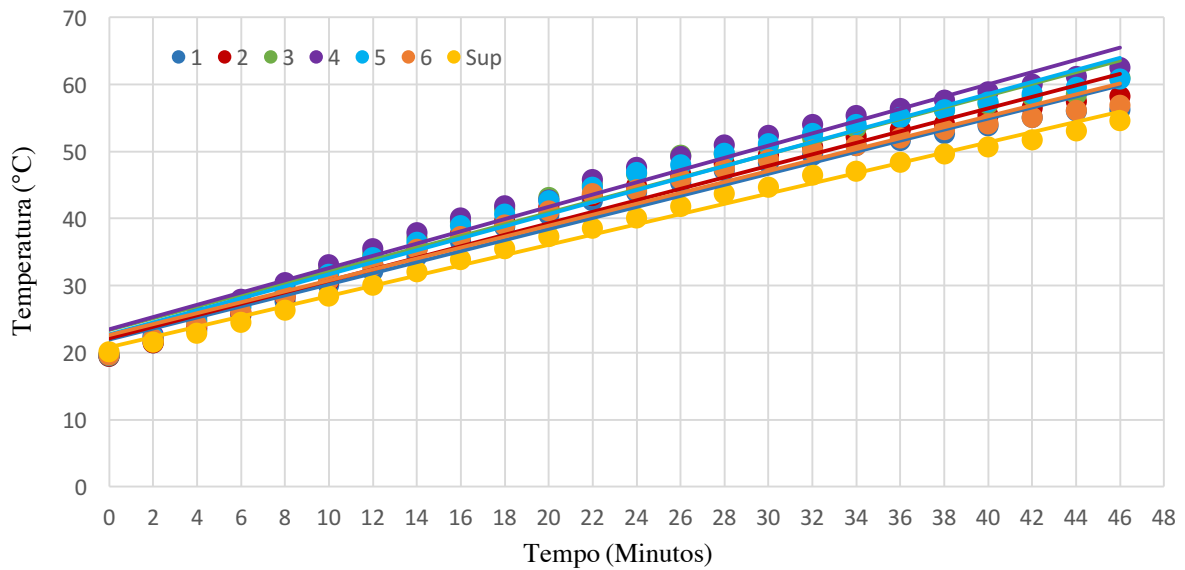


Figura 5.42 - Evolução da temperatura do provete de calcário através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts

Quadro 5.20 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.42

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 0.8228x + 21.956$	0.9766
2	$y = 0.8565x + 22.18$	0.97734
3	$y = 0.8742x + 23.368$	0.97319
4	$y = 0.9141x + 23.446$	0.97941
5	$y = 0.895x + 22.741$	0.97932
6	$y = 0.816x + 22.616$	0.97451
Sup	$y = 0,762x + 20.844$	0.99259

No que diz respeito à aplicação da potência mínima no provete de calcário, relata-se os seguintes fatores:

- Os pontos centrais revelaram uma temperatura maior para o mesmo tempo de aplicação de radiação, pois os pontos 4 e 5 foram aqueles que tiveram maiores valores de temperatura;
- Para ambas as zonas a temperatura era maior à medida que a profundidade aumentava;

- O fator que comprova o que foi enunciado no ponto anterior é o facto da temperatura à superfície, ao longo do tempo de aquecimento, registar sempre o valor mais baixo.
- Potência de 540 Watts

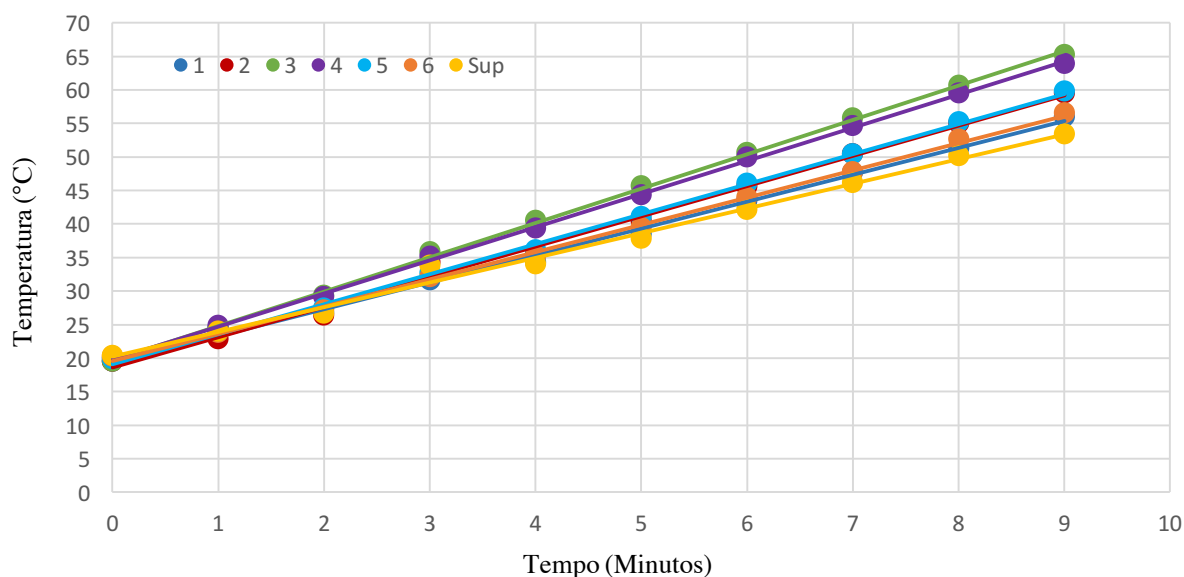


Figura 5.43 - Evolução da temperatura do provete de calcário através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts

Quadro 5.21 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.43

Ponto	Equação do gráfico	Coefficiente de determinação (R^2)
1	$y = 4x + 19.32$	0.99713
2	$y = 4.5115x + 18.618$	0.99438
3	$y = 5.1327x + 19.613$	0.99916
4	$y = 4.9442x + 19.791$	0.99945
5	$y = 4.48x + 19.06$	0.9986
6	$y = 4.0661x + 19.553$	0.99852
Sup	$y = 3.6776x + 20.271$	0.9918

Com a aplicação da potência de 540 Watts, foi possível concluir que:

- Neste caso já não se torna possível especificar uma zona onde tenha havido um aquecimento significativo, no entanto, pode-se dividir as temperaturas das sondas em 3

grupos, as sondas de 3, de 2 e de 1 cm, uma vez que os valores obtidos para essas profundidades estavam próximos uns dos outros;

- Pela avaliação do coeficiente de determinação presente no Quadro 5.21, a evolução das temperaturas das sondas seguiu um comportamento linear, pois encontra-se muito perto de um;
- Tal como na potência mínima, a temperatura à superfície foi a que teve um valor menor.
- Potência de 900 Watts

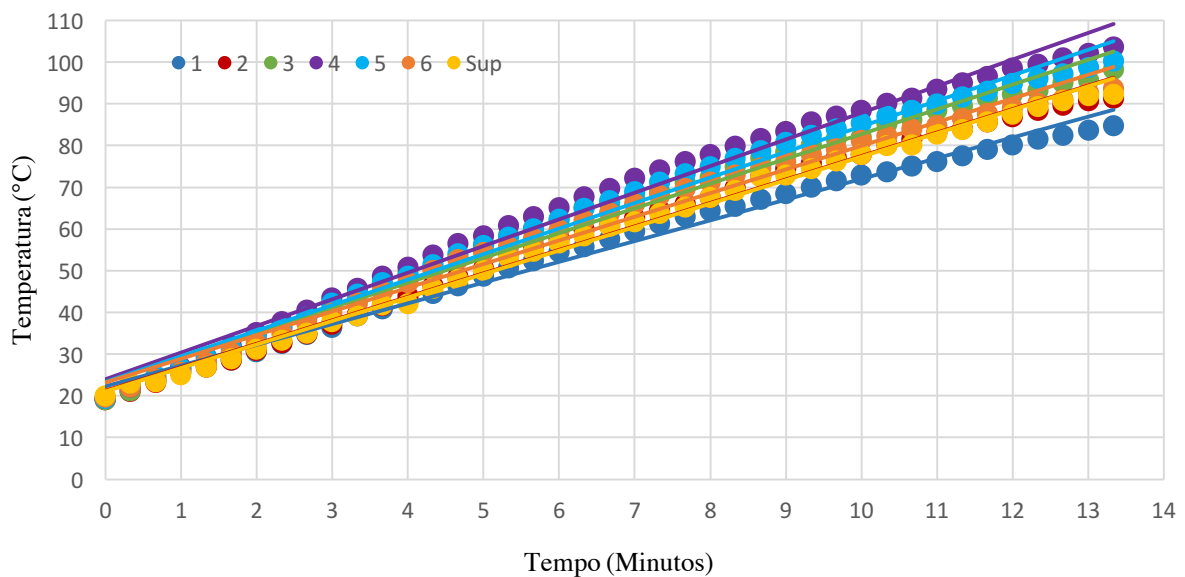


Figura 5.44 - Evolução da temperatura do provete de calcário através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts

Quadro 5.22 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.44

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 4.9799x + 22.205$	0.99141
2	$y = 5.6272x + 21.236$	0.99225
3	$y = 5.9335x + 23.392$	0.9878
4	$y = 6.392x + 23.95$	0.98852
5	$y = 6.1242x + 23.404$	0.99076
6	$y = 5.6756x + 23.226$	0.98764
Sup	$y = 5.6292x + 21.013$	0.99595

Após aplicação da potência máxima, foi permitido retirar algumas conclusões, nomeadamente:

- Que a zona central aqueceu mais, uma vez que os pontos mais profundos obtiveram as temperaturas maiores;
- Uma vez que o coeficiente de determinação de cada ponto está próximo de um, é viável dizer que o aquecimento manteve um comportamento linear.

Relativamente ao provete de calcário e após a aplicação de todas as potências concluiu-se que o aquecimento no interior do provete foi superior, quando comparados os valores obtidos nas sondas com aqueles registados à superfície.

▪ Aquecimento em estufa

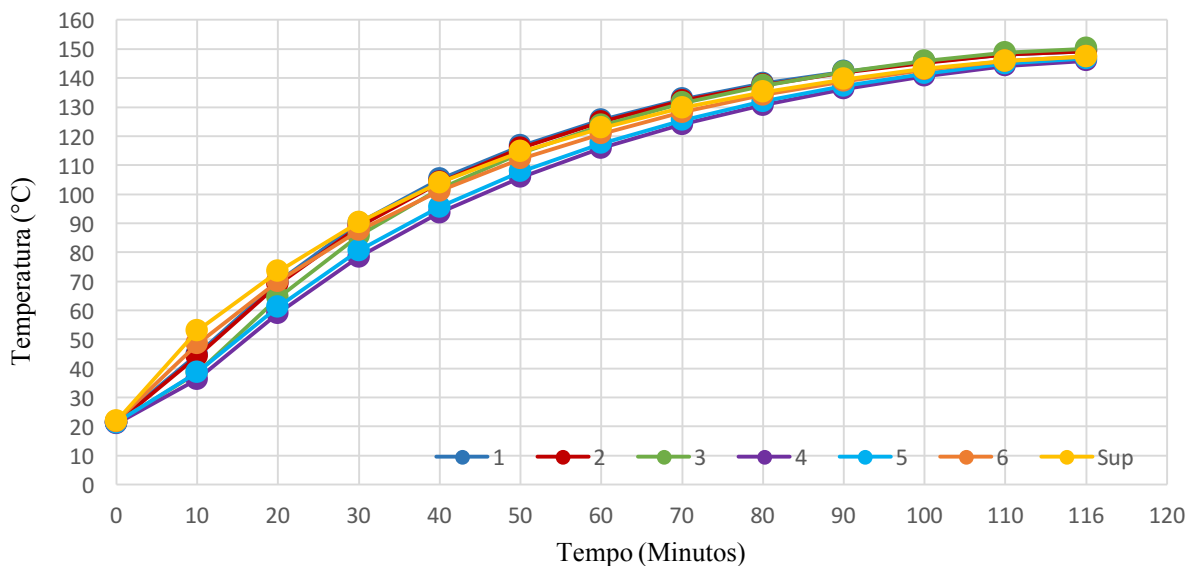


Figura 5.45 - Aquecimento em estufa do provete de calcário

A evolução da temperatura nos locais onde foram colocadas as sondas para medição de altas temperaturas procedeu-se de forma gradual, sem registo de grandes desvios. No entanto, pode ser mencionado o facto de até aos 80 minutos de aquecimento, os pontos que tinham as temperaturas mais baixas eram aqueles situados a meio do provete. Após os 80 minutos de aquecimento, acabaram por se aproximar dos restantes, à medida que se chegava perto dos 150 °C.

- Análise da evolução da temperatura à superfície através do termómetro Calex Soft

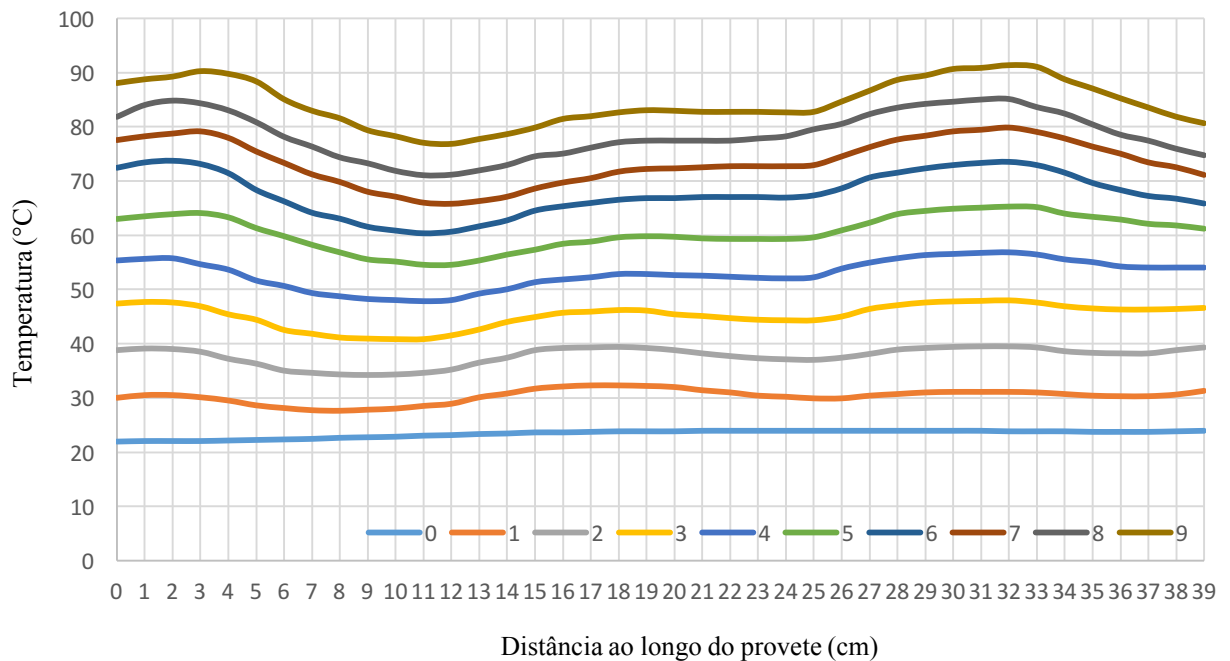


Figura 5.46 - Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de calcário através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

Tal como pode ser visto na figura acima, após alguns minutos de aquecimento tornou-se possível verificar uns pequenos picos de temperatura nas zonas extremas do provete, fazendo com que a zona central à superfície atingisse temperaturas ligeiramente inferiores, mas sem grande relevância.

Influência da potência aplicada



Figura 5.47 - Influência da potência do micro-ondas no aquecimento do provete de calcário

Neste caso o défice de temperaturas para cada uma das potências utilizadas, já se procedeu de uma forma mais equilibrada, uma vez que os intervalos obtidos após 9 minutos de radiação de micro-ondas, se encontram entre os 20 e 30 °C, respetivamente a diferença entre potência média e máxima, e entre potência mínima e média.

Com o uso da técnica de aquecimento através de radiação de micro-ondas para o mesmo local, e com a intenção de se atingir 100 °C, foi possível obter ganhos de 30 minutos, comparando com aquecimento convencional.

5.4. Basalto

O basalto é um tipo de rocha ígnea eruptiva de composição máfica, bastante dura, resistente à meteorização e difícil de trabalhar, no entanto é muitas vezes utilizada em obras de pavimentação. (Site Consultado nº 5)

Na Figura 5.48 apresenta-se o provete de basalto que foi utilizada durante os diversos ensaios.

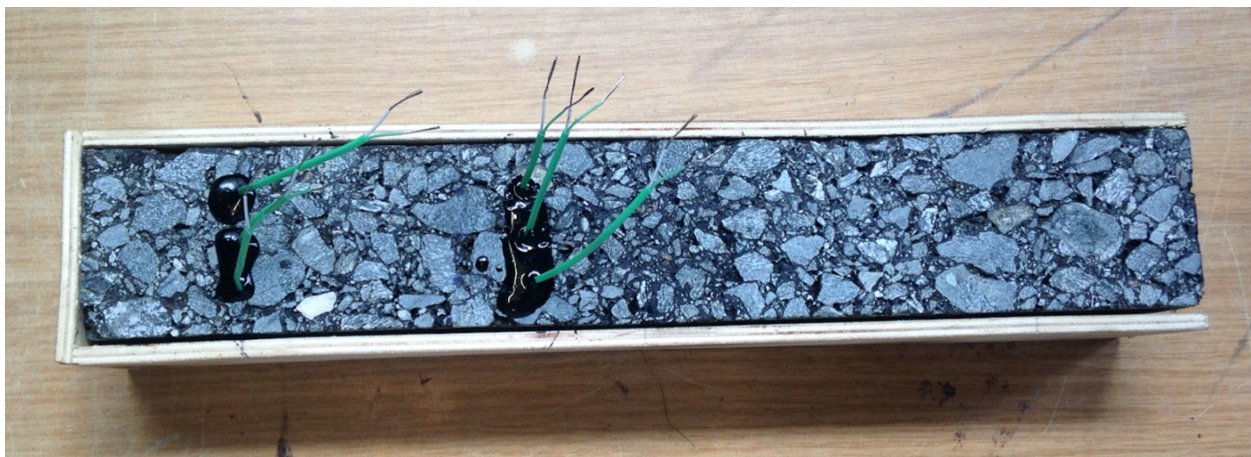


Figura 5.48 - Provete de basalto

Nas figuras que se seguem disponibilizam-se os gráficos realizados através dos resultados obtidos no aquecimento para cada potência aplicada.

- Potência de 180 Watts

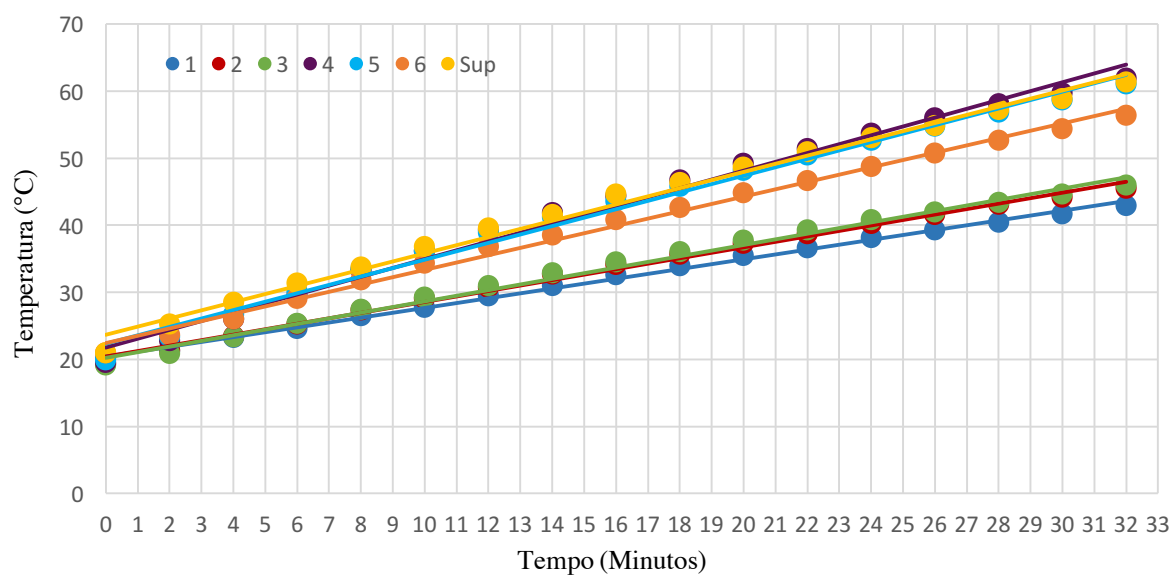


Figura 5.49 - Evolução da temperatura do provete de basalto através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts

Quadro 5.23 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.49

Ponto	Equação do gráfico	Coefficiente de determinação (R^2)
1	$y = 0.7235x + 20.424$	0.99699
2	$y = 0.8142x + 20.414$	0.99457
3	$y = 0.8387x + 20.269$	0.99268
4	$y = 1.3169x + 21.794$	0.98994
5	$y = 1.2547x + 22.314$	0.99132
6	$y = 1.0919x + 22.424$	0.99449
Sup	$y = 1.2151x + 23.659$	0.9922

A seguir à aplicação mínima de radiação de micro-ondas, verificou-se que:

- Foi revelado um aquecimento relativamente maior na zona central do provete em estudo, uma vez que os pontos dessa zona foram aqueles que tiveram temperaturas mais altas;
- Através do gráfico da Figura 5.49, é possível observar um ligeiro intervalo entre as temperaturas da zona extrema e da zona central;
- Apesar do ponto que obteve maior aquecimento foi o ponto 4, com 3 cm de profundidade, realça-se o facto da temperatura à superfície ter atingido valores muito próximos;
- De acordo com a coluna do coeficiente de determinação do Quadro 5.23, é possível ver que as temperaturas de todos os pontos, evoluíram de forma linear, uma vez que os valores do coeficiente se encontram muito próximos da unidade.

- Potência de 540 Watts

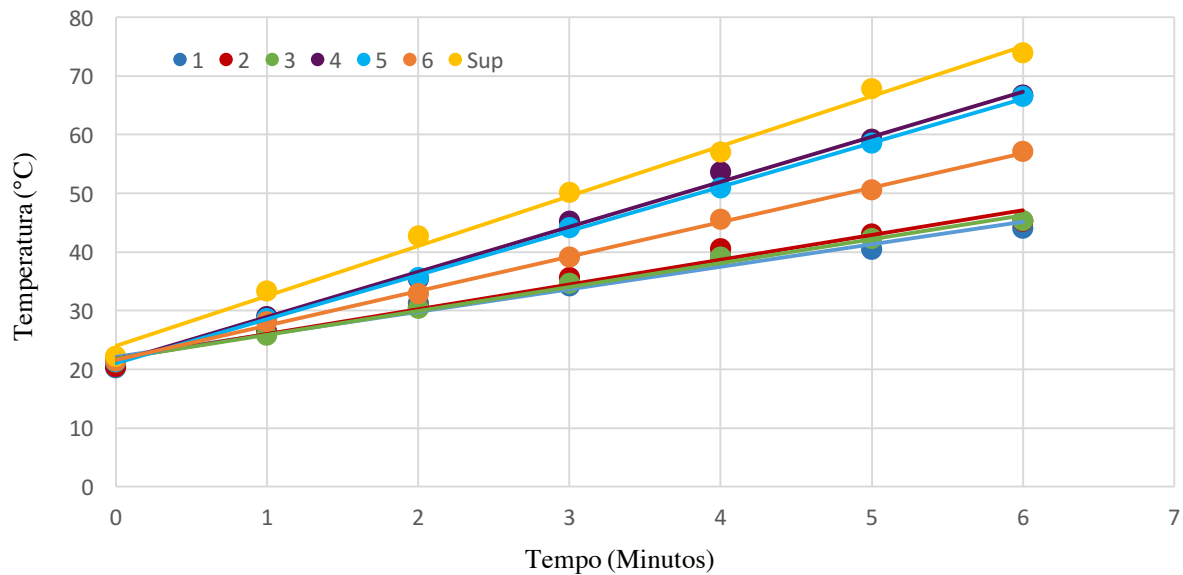


Figura 5.50 - Evolução da temperatura do provete de basalto através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts

Quadro 5.24 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.50

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 3.8357x + 22.136$	0.97353
2	$y = 4.225x + 21.782$	0.97981
3	$y = 4.0714x + 21.829$	0.99453
4	$y = 7.675x + 21.275$	0.99643
5	$y = 7.5107x + 21.082$	0.99954
6	$y = 5.875x + 21.561$	0.99893
Sup	$y = 8.5179x + 23.961$	0.9946

Posto isto, é aceitável dizer que:

- O aquecimento manteve-se superior na zona central do provete, o que já se tinha comprovado com aplicação da potência mínima;
- Nesta situação é visível um aquecimento superior à superfície do que nos pontos presentes no interior do provete;

- Apesar dos pontos 1 e 2 obterem valores ligeiramente inferiores, os restantes obtiveram coeficientes de determinação superiores a 0,99.
- Potência de 900 Watts

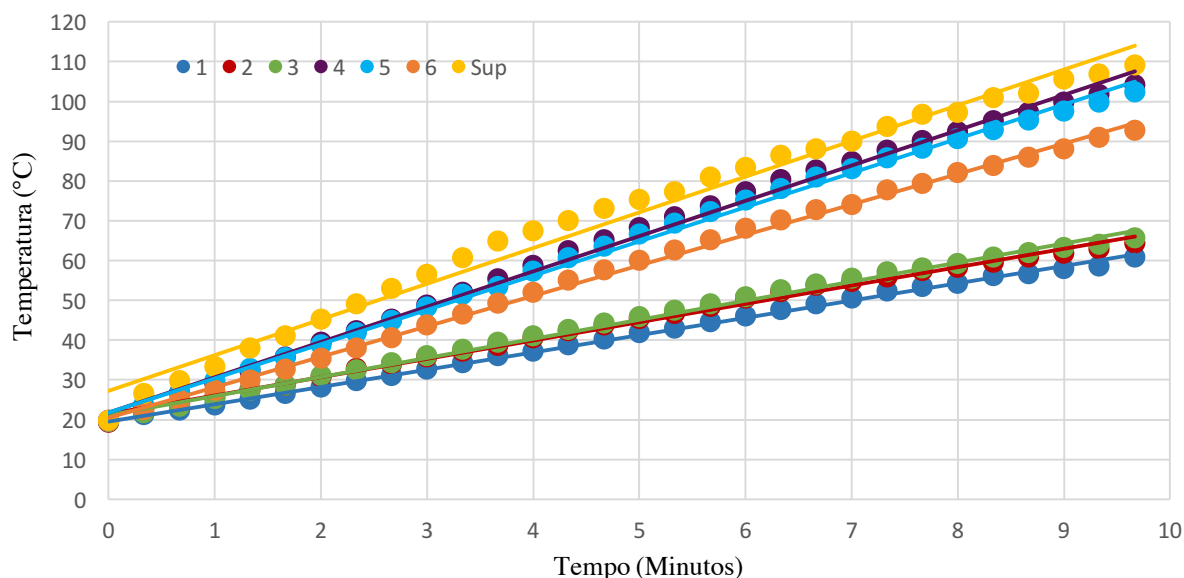


Figura 5.51 - Evolução da temperatura do provete de basalto através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts

Quadro 5.25 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.51

Ponto	Equação do gráfico	Coefficiente de determinação (R^2)
1	$y = 4.3299x + 19.602$	0.99842
2	$y = 4.6183x + 21.451$	0.99547
3	$y = 4.7965x + 21.063$	0.99597
4	$y = 8.8717x + 21.767$	0.99609
5	$y = 8.6024x + 21.849$	0.9972
6	$y = 7.6691x + 20.46$	0.99821
Sup	$y = 8.9767x + 27.229$	0.98614

Após a aplicação da potência de 900 Watts a este tipo de provete, é admissível relatar que:

- Comprovou-se um aquecimento superior à superfície do provete;

- Os pontos colocados na zona central foram os que obtiveram temperaturas maiores, quando comparados com os colocados na zona extrema;
- Em ambas as zonas é observado que à medida que se aumenta a profundidade a temperatura vai aumentando;

No que diz respeito ao provete de basalto após a conclusão de todos os ensaios, tirou-se as seguintes conclusões:

- Existe um aquecimento superior na zona central do provete, aquando a aplicação da radiação de micro-ondas;
- Através da análise dos diferentes gráficos é viável assumir que o provete de basalto atinge temperaturas à superfície superiores do que no seu interior;
- No entanto para ambas as zonas, no interior do provete comprova-se que à medida que a altura da sonda vai aumentando a temperatura registada vai subindo.

▪ Aquecimento em estufa

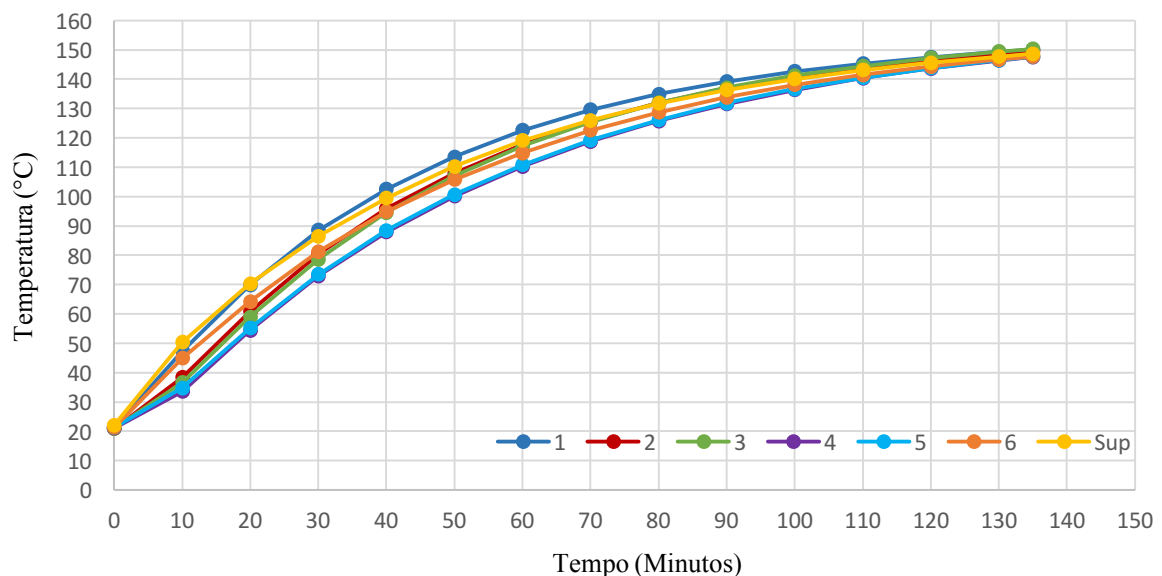


Figura 5.52 - Aquecimento em estufa do provete de basalto

Apesar de no início do aquecimento a zona central do provete ter apresentado as temperaturas mais baixas, no decorrer do mesmo, acabaram por se aproximar dos restantes pontos, e após

135 minutos de aquecimento em estufa, todos os pontos atingiram valores muito próximos de 150 °C.

- Análise da evolução da temperatura à superfície através do termómetro Calex Soft

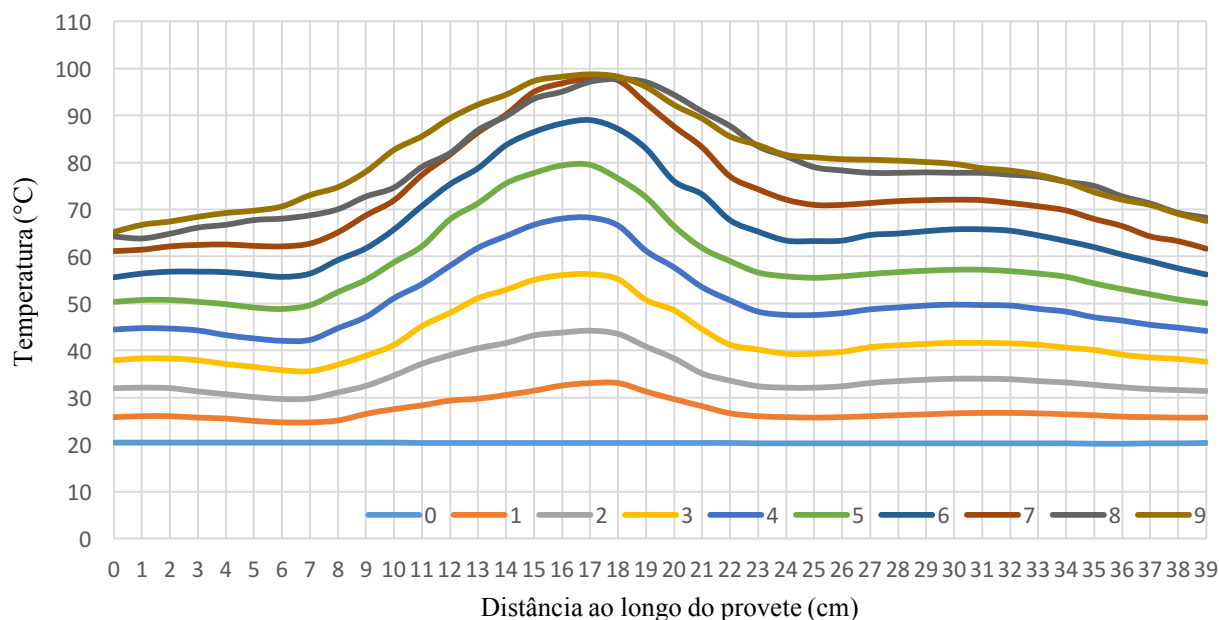


Figura 5.53 - Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de basalto através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

Como é comprovado na Figura 5.53, houve um elevado pico de temperatura à superfície na zona central do provete, logo após o primeiro minuto de radiação. Este acontecimento pode ser justificado através de fatores que comprovam que as micro-ondas tendem a incidir mais na zona central da câmara de cozimento.

Influência da potência aplicada

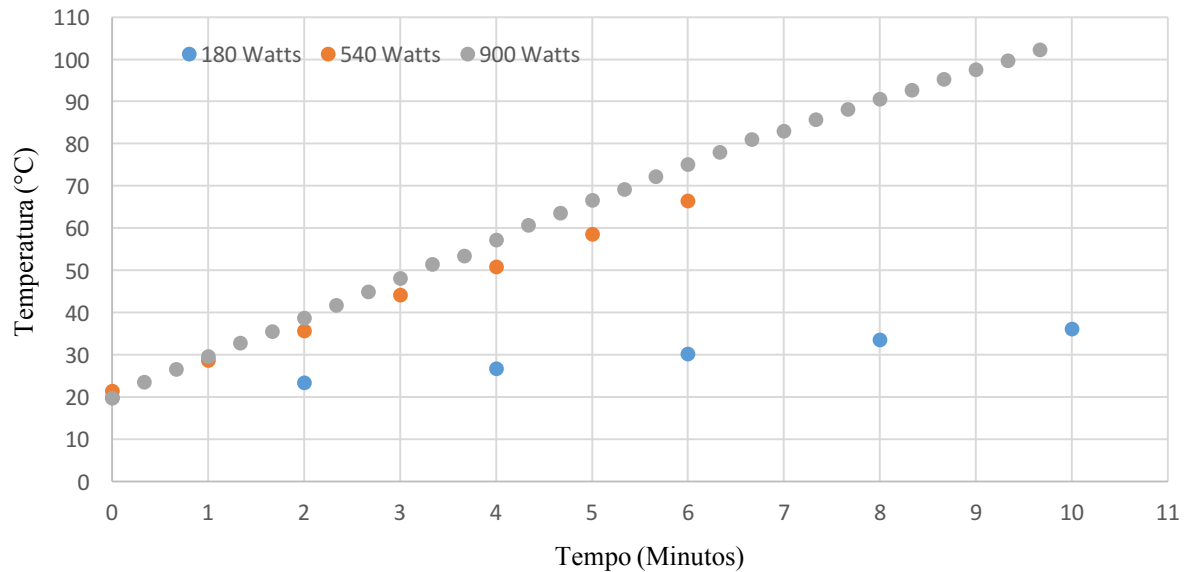


Figura 5.54 - Influência da potência do micro-ondas no aquecimento do provete de basalto

Existe um espaço de quase 40 °C de diferença entre a utilização da potência mínima e média. Já o défice de temperatura entre a potência média e máxima de radiação de micro-ondas aponta para valores ligeiramente inferiores a 10 °C.

Comparando as duas técnicas utilizadas neste estudo, e para o provete em questão, consegue-se obter ganhos de cerca de 30 minutos, aplicando radiação de micro-ondas ao provete.

5.5. Influência do agregado utilizado

Após se proceder ao aquecimento de todos os provetes através da radiação de micro-ondas, resolveu-se comparar a evolução da temperatura de cada provete, no ponto 5, situado na zona central dos provetes a uma profundidade de 2 cm, e com aplicação de radiação de micro-ondas de 900 Watts de potência. Os resultados alcançados podem ser observados na figura que se segue.

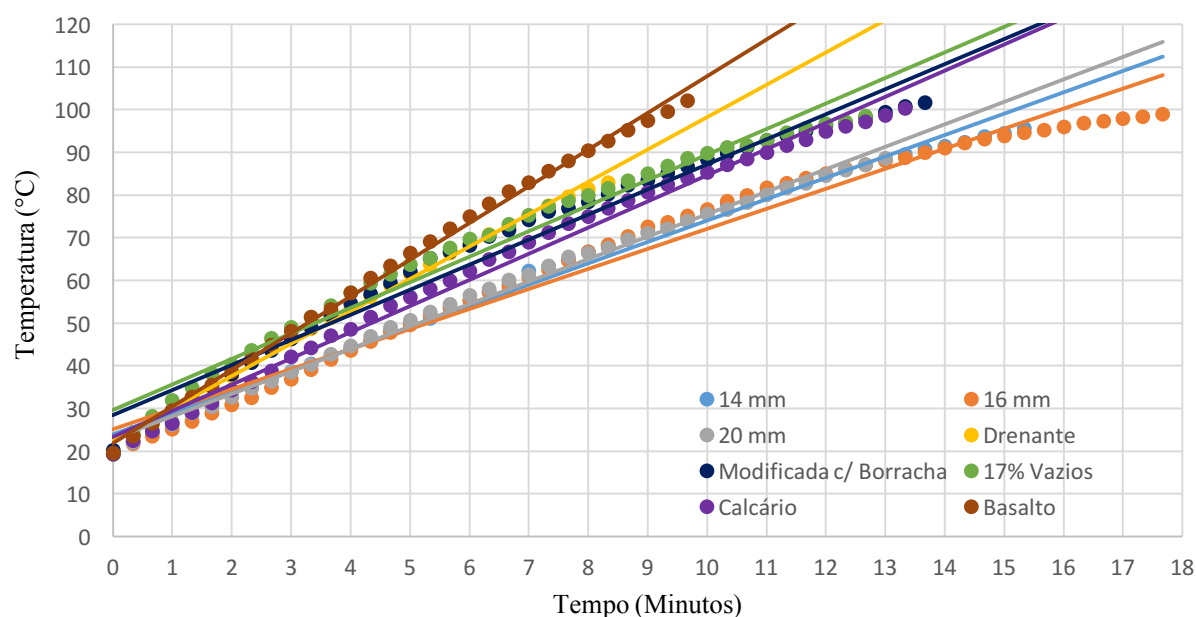


Figura 5.55 - Influência do agregado utilizado

Quadro 5.26 – Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.55

Tipo de provete	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
14 mm	$y = 5.0128x + 23.934$	0.99074
16 mm	$y = 4.6949x + 25.11$	0.9751
20 mm	$y = 5.2718x + 22.818$	0.99436
Drenante	$y = 7.5821x + 22.458$	0.99601
Modificada c/ Borracha	$y = 5.8761x + 28.453$	0.97442
17% Vazios	$y = 5.9879x + 29.661$	0.97236
Calcário	$y = 6.1242x + 23.404$	0.99076
Basalto	$y = 8.6024x + 21.849$	0.9972

Como pode ser observado na Figura 5.55, o provete que consegue atingir mais rapidamente altas temperaturas, nomeadamente acima de 90 °C, é o provete de basalto. Também é evidente que os provetes que utilizam granito como agregado foram aqueles que registaram temperaturas mais baixas e um aumento de temperatura menos acentuado que os restantes provetes.

Outro fator a ser evidenciado sobre a evolução da temperatura dos provetes em estudo, tem a ver com o facto dos provetes de calcário, de 17% de vazios e modificado com borracha, terem registado ao longo do estudo temperaturas muito semelhantes, como pode ser observado na proximidade das linhas de tendência de cada provete.

Através da análise do coeficiente de determinação de cada linha de tendência, presente no Quadro 5.26, é possível afirmar que a evolução da temperatura se procedeu segundo um regime linear.

5.6. Estudo da contribuição térmica do agregado

Para o estudo deste ponto, foram utilizados dois tipos de caixas de madeira, nomeadamente uma caixa com as seguintes dimensões $38 \times 5 \times 6 \text{ cm}^3$ e outra com $5 \times 5 \times 6 \text{ cm}^3$. Posteriormente procedeu-se à comparação dos resultados obtidos em ambas as caixas.

Os agregados utilizados para a realização desta pesquisa foram de dois tipos:

- Agregado britado fino do tipo 4/6, em que o tamanho da brita variava entre 4 e 6 mm de tamanho;
- Agregado britado médio do tipo 6/14, o qual o seu tamanho estava entre 6 e 14 mm.

5.6.1. Agregado britado fino do tipo 4/6

Na Figura 5.56 é possível observar os três locais em que foram retiradas as temperaturas à superfície através do uso do termómetro infravermelho com mira laser. Embora tenha sido tentado analisar as temperaturas no interior do agregado, não foi possível devido ao facto do material não ser uniforme, mas também devido às sondas não estarem a transmitir valores aceitáveis para o efeito.



Figura 5.56 - Agregado 4/6 na caixa de dimensões $38 \times 5 \times 6 \text{ cm}^3$

Para a caixa mais pequena o registo da temperatura aconteceu no centro da mesma, fazendo análise a apenas um ponto. Na Figura 5.57 é possível observar a disposição do agregado na caixa em questão.



Figura 5.57 - Agregado 4/6 na caixa de dimensões 5x5x6cm³

O uso de dois tamanhos de caixas para a realização deste ensaio tem o objetivo de se perceber a influência da quantidade de agregado no aquecimento por micro-ondas.

De seguida são apresentados os gráficos da evolução da temperatura após aquecimento por radiação de micro-ondas para as diferentes potências.

- Potência de 180 Watts
 - Caixa de 38x5x6cm³

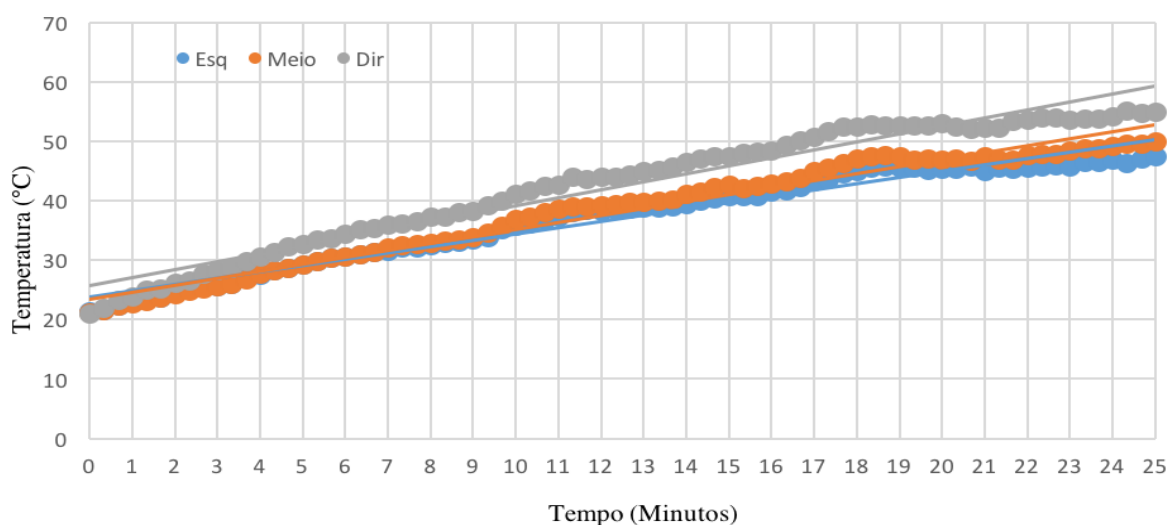


Figura 5.58 - Evolução da temperatura do agregado 4/6 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts

Quadro 5.27 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.58

Zona	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
Esquerda	$y = 1.0616x + 23.839$	0.96487
Meio	$y = 1.1766x + 23.455$	0.97005
Direita	$y = 1.3469x + 25.737$	0.95613

Após o agregado ser submetido a radiação de micro-ondas de potência mínima, e através da observação da Figura 5.58, concluiu-se que existe um aquecimento maior na zona direita. É presumível que este fator se deve ao facto de ser a zona que se encontra mais próxima da fonte de energia. Também é observável que os valores das temperaturas da esquerda e do meio se encontram muito próximas.

- Potência de 540 Watts
 - Caixa de $38 \times 5 \times 6 \text{ cm}^3$

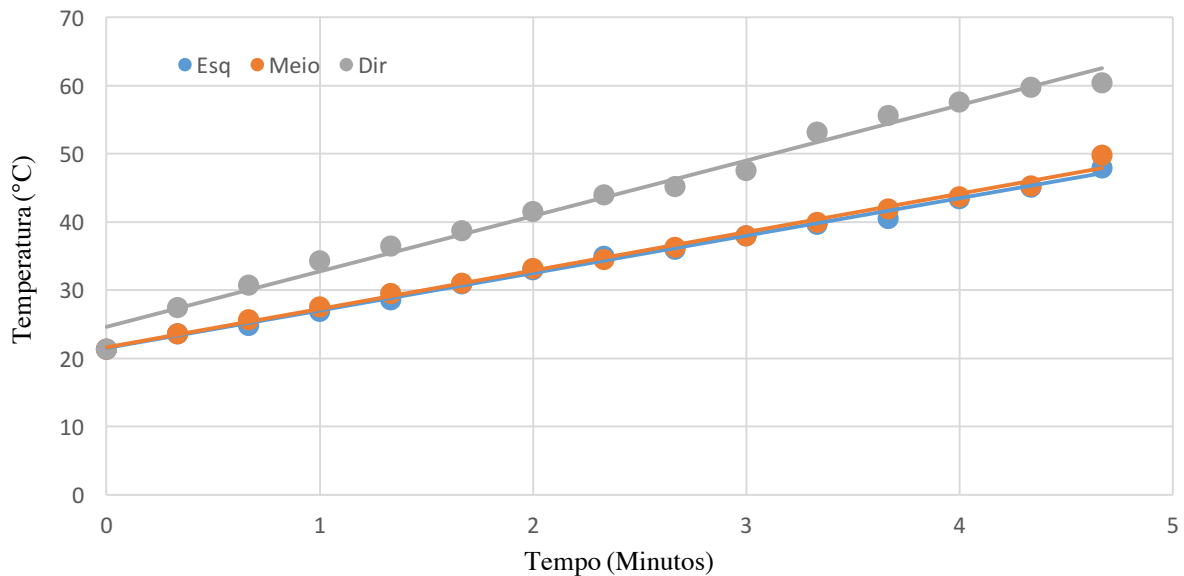


Figura 5.59 - Evolução da temperatura do agregado 4/6 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts

Quadro 5.28 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.59

Zona	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
Esquerda	$y = 5.4921x + 21.478$	0.99685
Meio	$y = 5.6346x + 21.586$	0.99424
Direita	$y = 8.1311x + 24.594$	0.9868

No que diz respeito à evolução da temperatura do agregado 4/6 após a aplicação de radiação de micro-ondas, utilizando a potência média, pode-se dizer que o comportamento se mantém, uma vez que existe um aquecimento superior na parte direita e as outras duas zonas estão praticamente com os mesmos valores.

- Potência de 900 Watts
 - Caixa de $38 \times 5 \times 6 \text{ cm}^3$

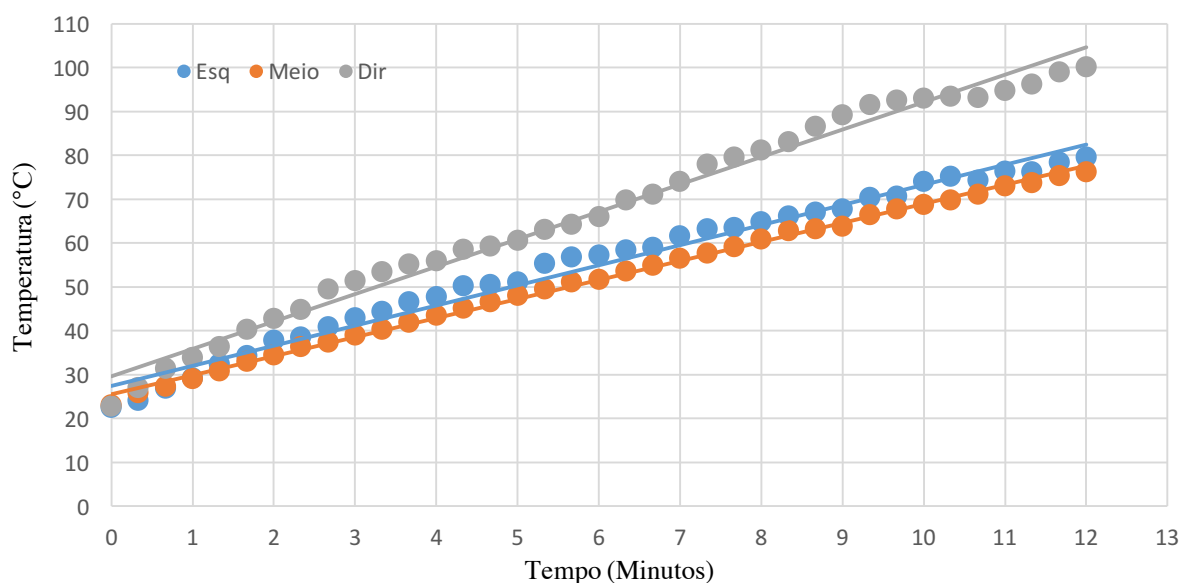


Figura 5.60 - Evolução da temperatura do agregado 4/6 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts

Quadro 5.29 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.60

Zona	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
Esquerda	$y = 4.5834x + 27.476$	0.98197
Meio	$y = 4.3333x + 25.549$	0.9975
Direita	$y = 6.2494x + 29.555$	0.9863

Após a análise do gráfico da Figura 5.60, referente ao aquecimento de agregado utilizando uma potência de 900 Watts, o aquecimento revela-se maior na parte direita, seguido da parte esquerda e por fim a zona central.

Como conclusão sobre o aquecimento de agregado 4/6 através de micro-ondas, tornou-se evidente que este era maior na parte direita da amostra, o que pode ser traduzido pelo facto de esta ser a mais próxima da fonte de energia.

Influência da potência aplicada

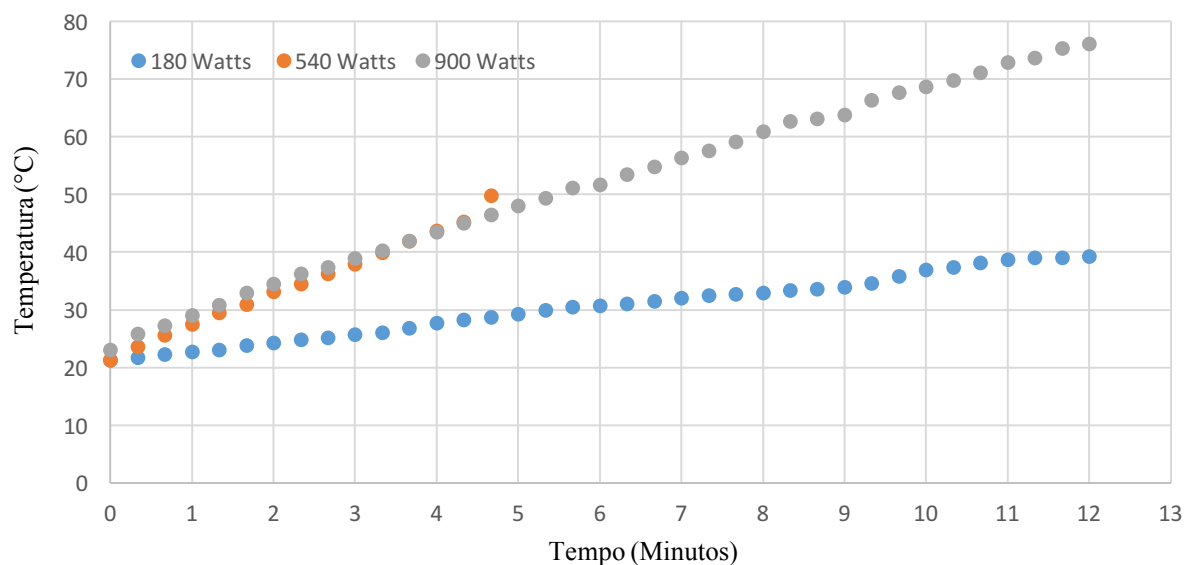


Figura 5.61 - Influência da potência do micro-ondas no aquecimento de agregado do tipo 4/6

De acordo com os valores presentes no gráfico da Figura 5.61, que consistem na comparação da evolução das temperaturas da zona central para as diversas potências, a temperatura do agregado do tipo 4/6 evoluiu de uma forma muito semelhante quando se utilizou a potência de 540 Watts e a potência de 900 Watts, uma vez que os valores de ambas as potências andam muito próximos uns dos outros.

5.6.2. Agregado britado médio do tipo 6/14

A análise para este tipo de agregado procedeu-se da mesma forma que a utilizada para o agregado 4/6. As Figuras 5.62 e 5.63, ilustram o preenchimento de cada caixa com o material em questão.



Figura 5.62 - Agregado 4/6 na caixa de dimensões 38x5x6cm³



Figura 5.63 - Agregado 6/14 na caixa de dimensões 5x5x6cm³

Como foi explicado no ponto 5.6.1, o uso de dois tamanhos de caixas para a realização deste ensaio tem o objetivo de se perceber a influência da quantidade de agregado no aquecimento por micro-ondas.

Nas figuras que se seguem são apresentados os gráficos da evolução da temperatura do material em estudo para cada tipo de potência.

- Potência de 180 Watts
 - Caixa de 38x5x6cm³

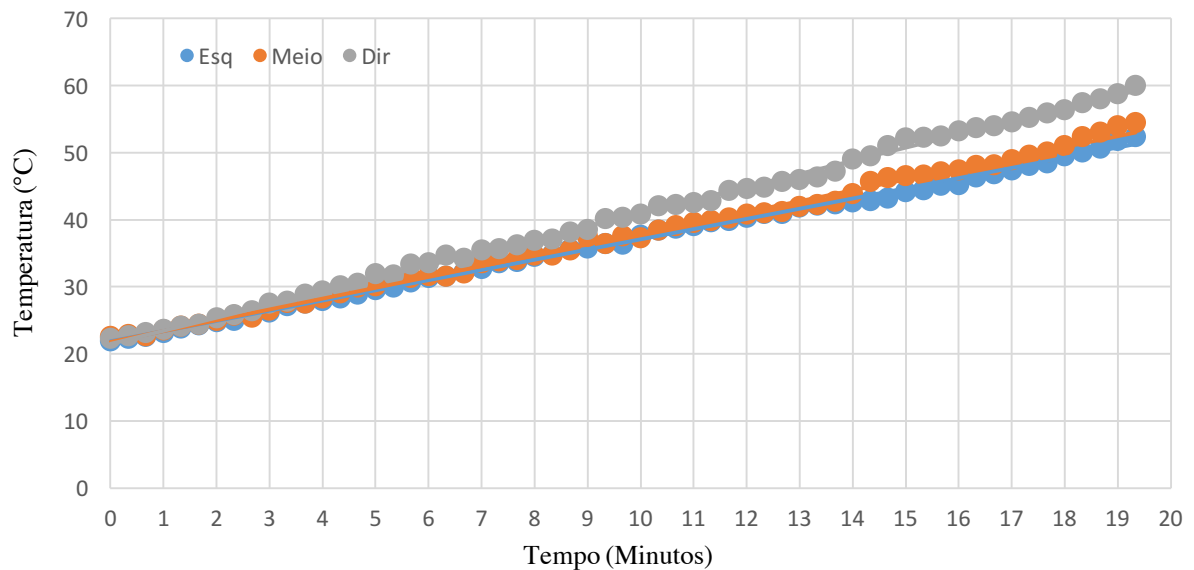


Figura 5.64 - Evolução da temperatura do agregado 6/14 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts

Quadro 5.30 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.64

Zona	Equação do gráfico	Coefficiente de determinação (R^2)
Esquerda	$y = 1.5199x + 21.872$	0.99743
Meio	$y = 1.6178x + 21.761$	0.99591
Direita	$y = 1.9491x + 21.518$	0.99801

Após a realização deste ensaio, concluiu-se que:

- O aquecimento é maior na zona direita da amostra;
- Apesar da zona intermédia surgir como a segunda zona em que o aquecimento foi maior, a parte esquerda também obteve valores muito próximos desta;
- Tal como mostram os valores do coeficiente de determinação, que se encontram próximos de um, o comportamento da temperatura de cada sonda foi linear.

- Potência de 540 Watts
 - Caixa de 38x5x6cm³

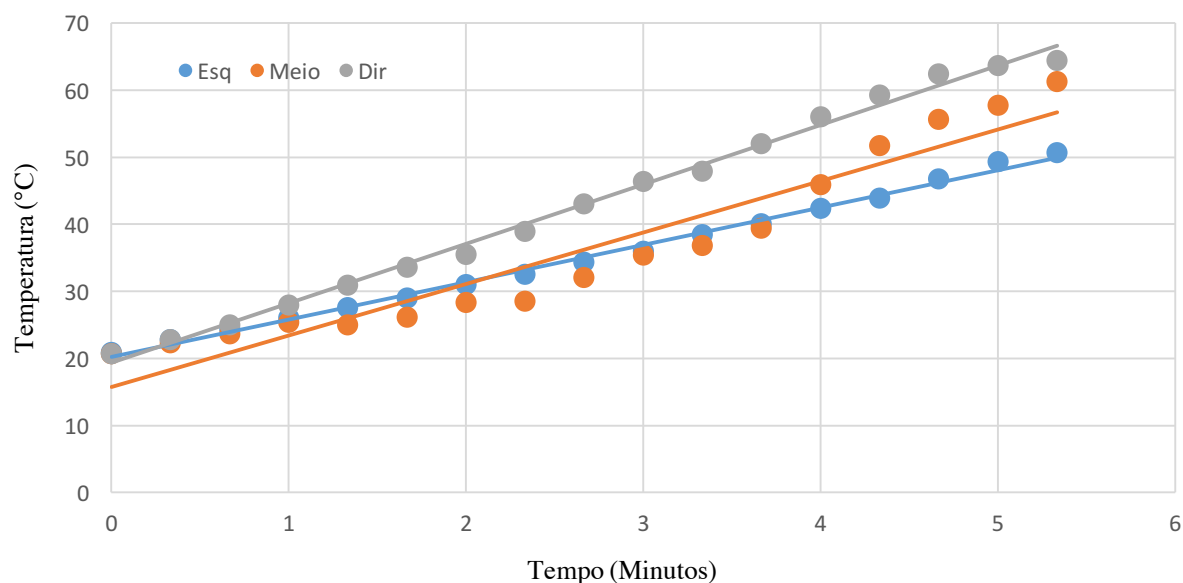


Figura 5.65 - Evolução da temperatura do agregado 6/14 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts

Quadro 5.31 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.65

Zona	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
Esquerda	$y = 5.5838x + 20.18$	0.99548
Meio	$y = 7.6684x + 15.78$	0.92354
Direita	$y = 8.8581x + 19.349$	0.99466

Posteriormente à realização deste ensaio de aquecimento, afirma-se o seguinte:

- Registou-se um aquecimento maior na zona direita;
- Houve um ligeiro afastamento de alguns pontos a meio do ensaio na zona intermédia, o que fez com que o coeficiente de determinação baixasse um pouco. No entanto, nos outros pontos, este manteve-se muito próximo de um.

- Potência de 900 Watts
 - Caixa de 38x5x6cm³

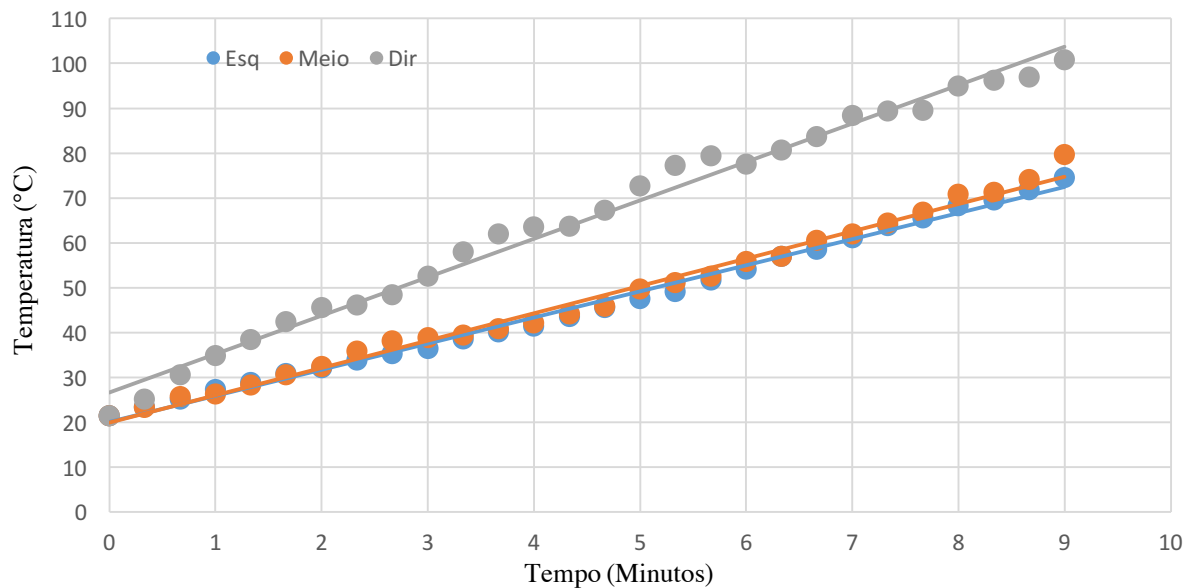


Figura 5.66 - Evolução da temperatura do agregado 6/14 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts

Quadro 5.32 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.66

Zona	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
Esquerda	$y = 5.8229x + 20.022$	0.9938
Meio	$y = 6.0962x + 19.931$	0.99039
Direita	$y = 8.5798x + 26.562$	0.98818

Em relação à utilização desta potência, consegue-se realçar o seguinte:

- Mantém-se a mesma evolução das temperaturas registadas anteriormente;
- Com auxílio da informação presente no Quadro 5.32, verifica-se que a evolução das temperaturas seguiu um comportamento linear ao longo do ensaio.

Em suma, consegue-se evidenciar que:

- O aquecimento é maior na zona mais próxima da fonte de energia;

- Em contrapartida ao realçado anteriormente, a zona mais afastada da fonte de energia apresenta temperaturas inferiores comparando com as restantes;
- É possível atingir temperaturas elevadas num curto intervalo de tempo de aquecimento.

Influência da potência aplicada

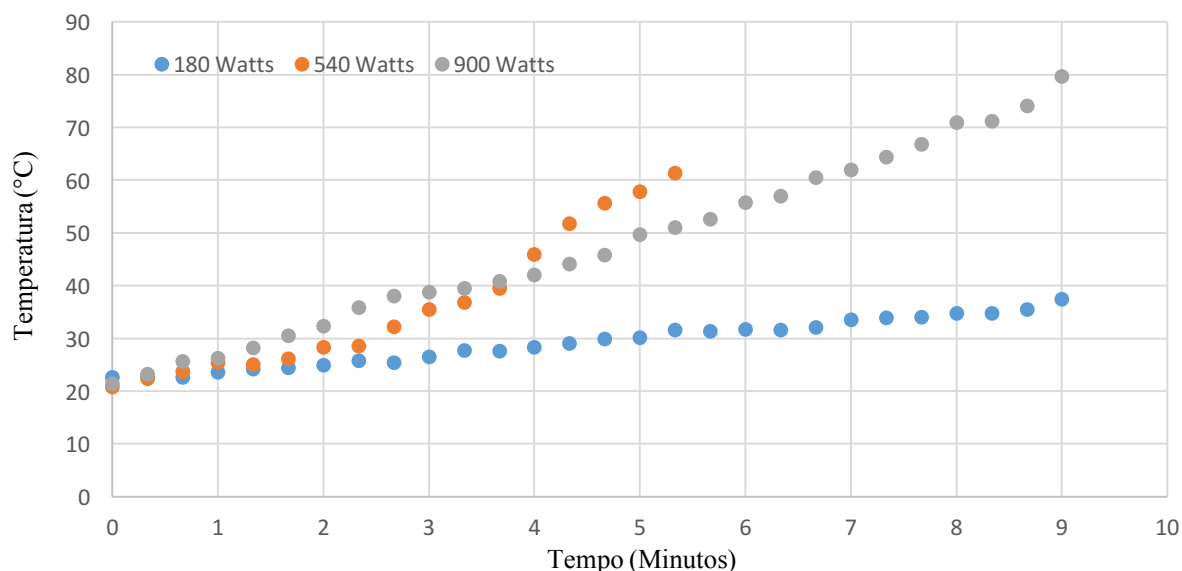


Figura 5.67 - Influência da potência do micro-ondas no aquecimento de agregado do tipo 6/14

Comparando a evolução da temperatura na zona central quando aplicadas as três potências, pode ser observado na figura acima, que o aquecimento feito utilizando a potência igual a 540 Watts, e para o mesmo tempo de aquecimento, registou um valor mais alto do que o verificado com a utilização das restantes potências.

5.6.3. Comparação do comportamento dos diferentes agregados

Através do uso das amostras das Figuras 5.57 e 5.63, e medindo as temperaturas verificadas no decorrer dos ensaios, foram feitos alguns gráficos com o objetivo de comparar a evolução das temperaturas verificadas para cada tipo de agregado utilizado. Posto isto, nas figuras que se seguem apresenta-se o trabalho realizado.

- Potência de 180 Watts

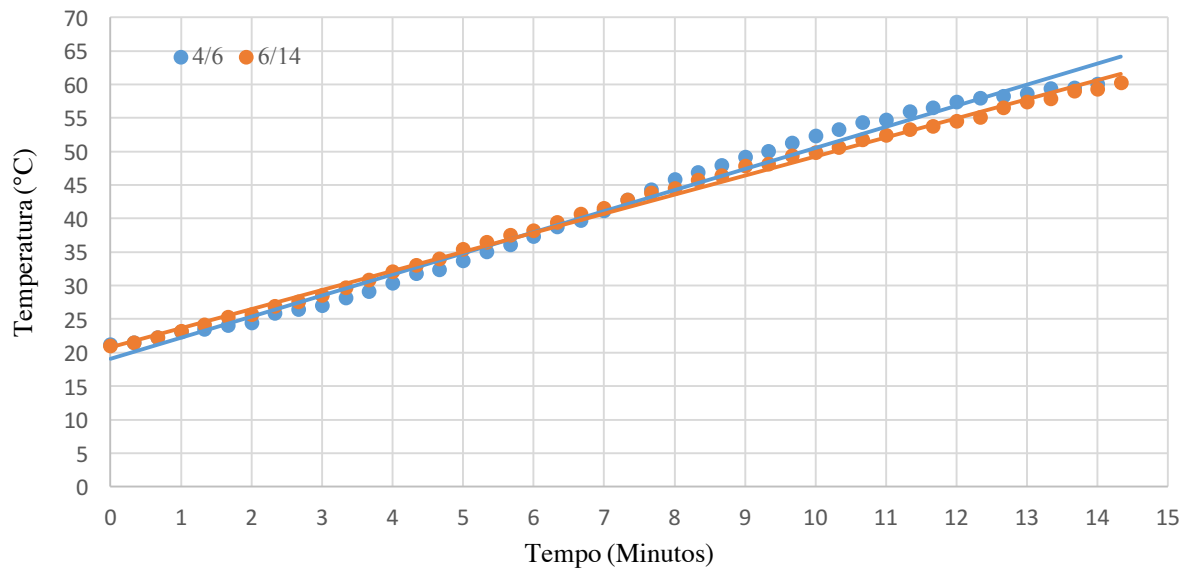


Figura 5.68 - Evolução da temperatura dos agregados 4/6 e 6/14 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts

Quadro 5.33 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.68

Tipo de Agregado	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
Agregado 4/6	$y = 3.1449x + 19.074$	0.9897
Agregado 6/14	$y = 2.8492x + 20.772$	0.99639

Após a conclusão deste estudo, apurou-se que a evolução da temperatura de ambos os agregados foi muito semelhante, como se pode ver na Figura 5.68. No entanto, o agregado menor, na parte final do ensaio obteve uma temperatura ligeiramente maior.

- Potência de 540 Watts

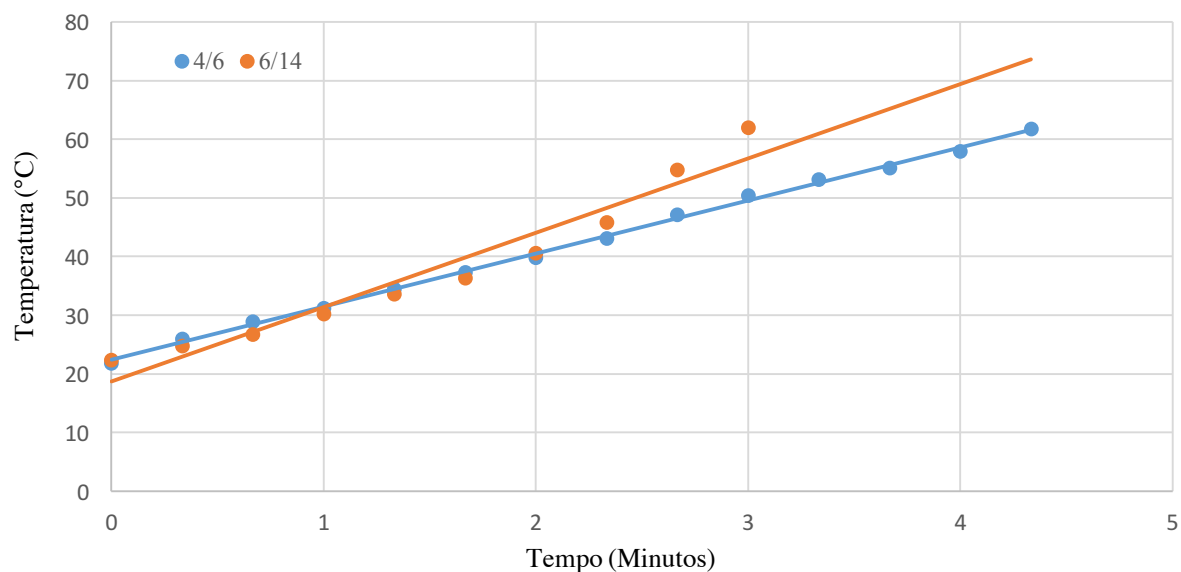


Figura 5.69 - Evolução da temperatura dos agregados 4/6 e 6/14 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts

Quadro 5.34 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.69

Tipo de Agregado	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
Agregado 4/6	$y = 9.0475x + 22.397$	0.99818
Agregado 6/14	$y = 12.651x + 18.744$	0.94441

No fim deste estudo verificou-se que o agregado 6/14 superou os 60 °C mais rapidamente do que o agregado 4/6 em cerca de 1 minuto e 20 segundos.

- Potência de 900 Watts

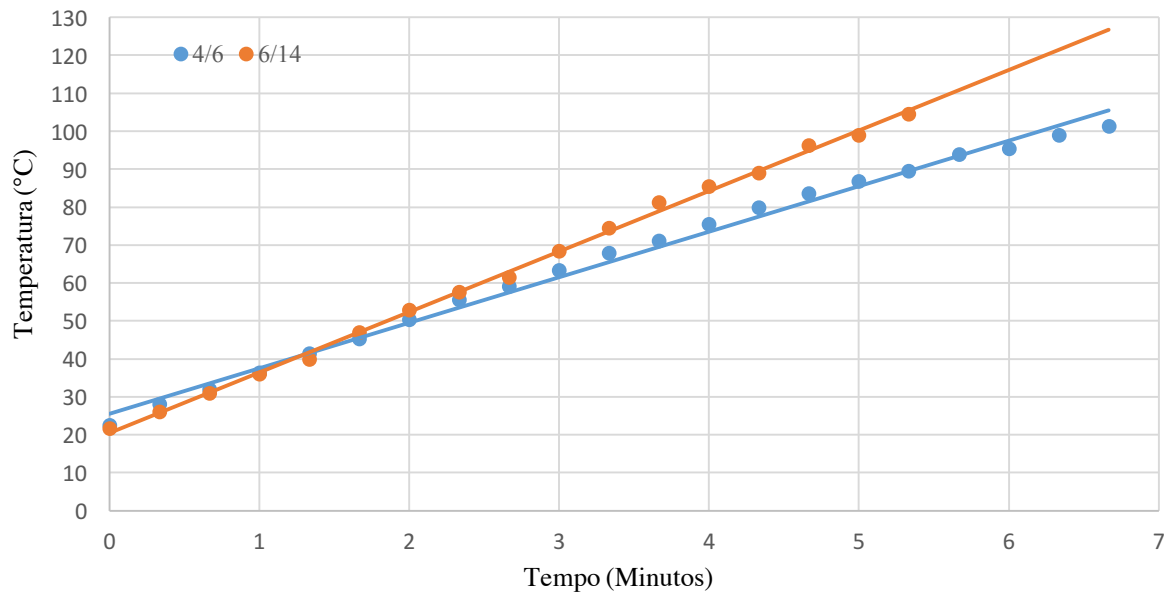


Figura 5.70 - Evolução da temperatura dos agregados 4/6 e 6/14 através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts

Quadro 5.35 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.70

Tipo de Agregado	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
Agregado 4/6	$y = 11.991x + 25.497$	0.99376
Agregado 6/14	$y = 15.957x + 20.371$	0.99822

Com auxílio do gráfico presente na Figura 5.70, é admissível assumir que:

- Para atingir o critério de paragem estabelecido, o agregado maior, levou menos tempo de aquecimento;
- A temperatura de ambos os agregados evoluiu de forma linear, como pode ser comprovado no Quadro 5.35 no coeficiente de determinação.

Para conclusão sobre a comparação dos agregados testados, esclarece-se o seguinte:

- Com potências mais elevadas, o agregado maior aquece de uma forma mais rápida do que o menor. Facto que não se torna evidente aquando a aplicação da potência mínima;

- Em pouco tempo, torna-se possível que agregados atinjam temperaturas relativamente elevadas, o que pode ser um fator importante na produção de misturas betuminosas.
- Por fim, comparando a evolução dos agregados aquando da utilização das duas caixas, verificou-se que o uso de quantidades menores de agregado permitem um aquecimento mais rápido.

5.7. Betume

O betume é o ligante mais utilizado em trabalhos de pavimentação rodoviária. É proveniente da destilação do petróleo bruto, em que as frações mais leves mantêm-se no estado de vapor e as mais pesadas são retiradas sob a forma de resíduo, a que se atribui o nome de betume.

A composição deste material resume-se à junção de vários tipos de substâncias, nomeadamente: 80 a 85% de carbono, 10 a 15% de hidrogénio, 2 a 3% de oxigénio, enxofre e azoto, vestígios de metais (vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio). Pais, J. (2015).

Na Figura 5.48 apresenta-se a distribuição das sondas pela caixa de madeira utilizada para a realização dos ensaios, em que as profundidades das sondas da esquerda para a direita são de 1, 2 e 3cm. Encheu-se a caixa de madeira com betume até este atingir cerca de 5cm de altura.

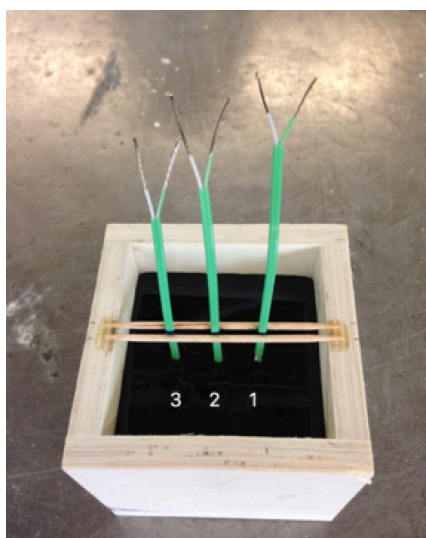


Figura 5.71 – Amostra de betume utilizada

O uso dos palitos foi com o objetivo das sondas se manterem intactas durante o aquecimento, uma vez que à medida que a temperatura aumentava o betume tornava-se cada vez mais mole,

o que podia alterar de uma forma significativa as profundidades das sondas. Devido ao mesmo problema, o tempo de aquecimento neste caso foi de 20 segundos para todas as potências aplicadas.

Nas seguintes figuras são apresentados os gráficos da evolução da temperatura das sondas para cada potência aplicada.

- Potência de 180 Watts

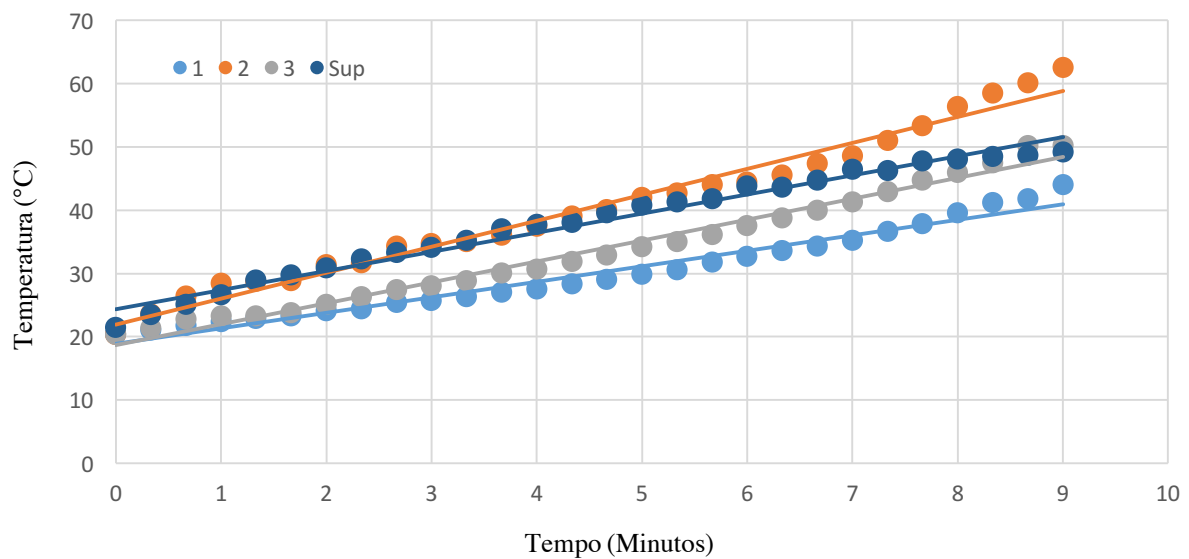


Figura 5.72 – Evolução da temperatura do betume através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts

Quadro 5.36 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.72

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 2.4533x + 18.857$	0.97006
2	$y = 4.1089x + 21.913$	0.97967
3	$y = 3.302x + 18.67$	0.98357
Sup	$y = 3.02x + 24.367$	0.97912

Após a conclusão do estudo com a potência de 180 Watts numa amostra de betume, expõe-se os seguintes fatores:

- O aquecimento foi superior no centro da amostra, pois o ponto 2 obteve uma temperatura mais elevada que os restantes;
- A segunda temperatura mais alta foi a verificada à superfície, tirada a meio da amostra, comprovando que o aquecimento no centro era maior;
- Também pode ser exposto que o facto do ponto 3 estar mais próximo da fonte de energia do que o ponto 1, e fazendo uma comparação entre eles, pode-se relatar que teve influência para que o ponto 3 tivesse valores ligeiramente superiores.

- Potência de 540 Watts

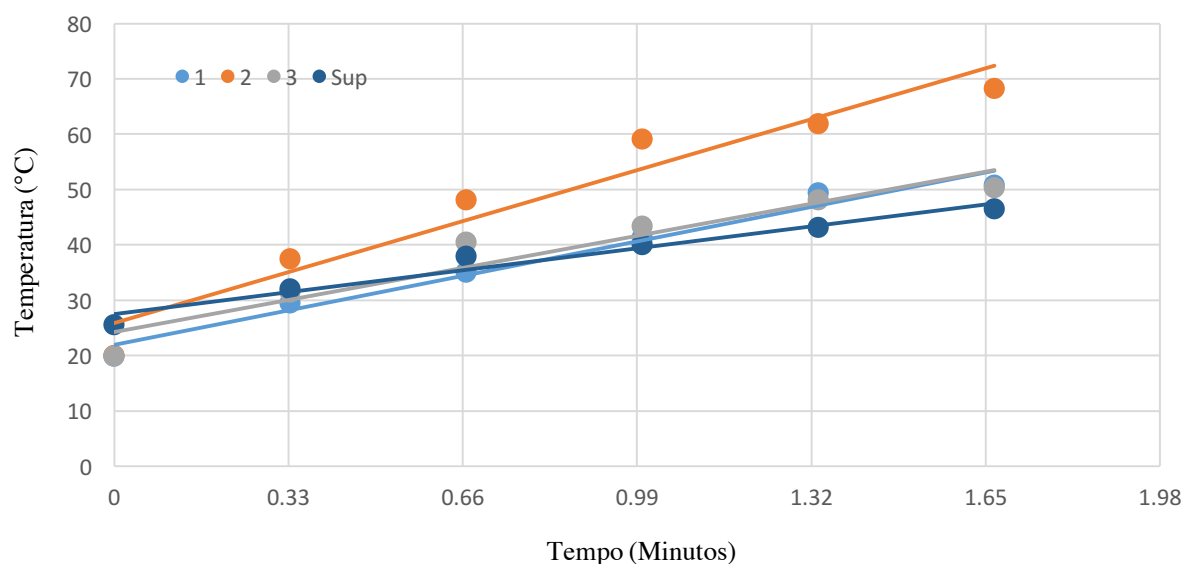


Figura 5.73 - Evolução da temperatura do betume através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts

Quadro 5.37 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.73

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 18.857x + 21.919$	0.97358
2	$y = 27.874x + 25.871$	0.93791
3	$y = 17.563x + 24.281$	0.91741
Sup	$y = 12.034x + 27.471$	0.96103

Relativamente a este ponto é aceitável referir o seguinte:

- Surgiu um aquecimento superior na sonda colocada no meio da amostra, a 2 cm de profundidade;
- Os pontos a 1 e 3 cm obtiveram valores muito semelhantes;
- Através do gráfico da Figura 5.73 é possível ver que o aquecimento se deu muito rápido, atingindo o critério de paragem abaixo dos 2 minutos.
- Potência de 900 Watts

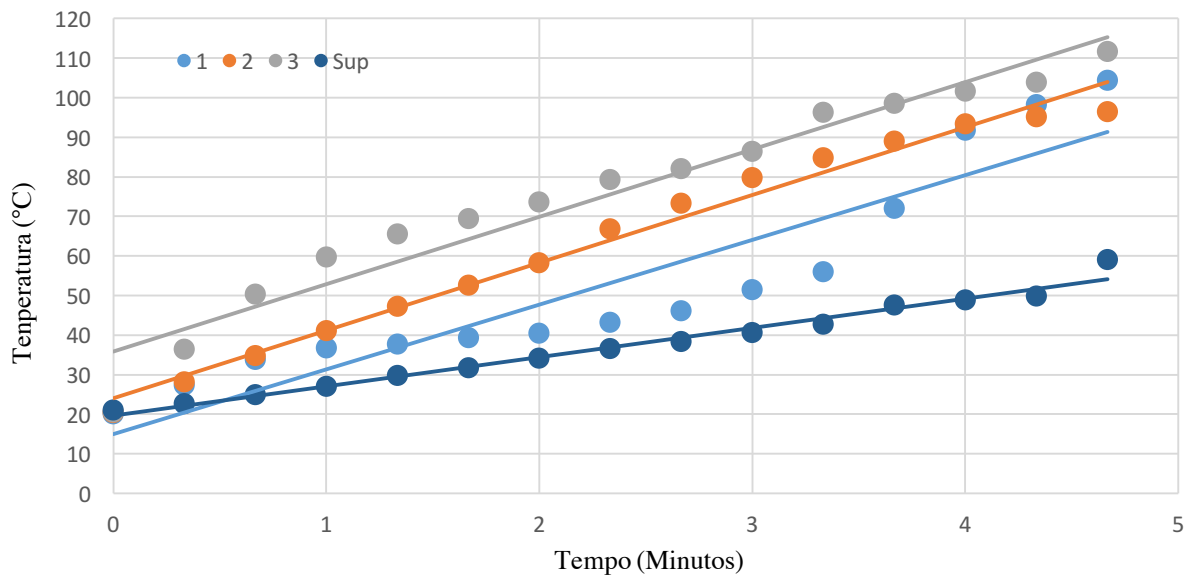


Figura 5.74 - Evolução da temperatura do betume através do aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts

Quadro 5.38 - Equações da evolução da temperatura para condições da Figura 5.74

Ponto	Equação do gráfico	Coeficiente de determinação (R^2)
1	$y = 16.399x + 14.882$	0.86646
2	$y = 17.151x + 23.96$	0.98462
3	$y = 17.021x + 35.898$	0.94871
Sup	$y = 7.4175x + 19.573$	0.97923

Quanto à aplicação da radiação máxima na amostra de betume, conclui-se que:

- Neste ensaio já se verificou um aquecimento maior na sonda mais perto da fonte de energia, colocada a 3 cm de profundidade da amostra;
- Os valores registados não seguiram de forma tão eficaz a linha de tendência, como se tinha verificado até então nos ensaios realizados. Embora se tenha usado os palitos com o objetivo de manter as sondas nas profundidades certas, este método não se revelou totalmente eficaz, uma vez que após submeter o betume a aquecimento por micro-ondas, o betume amolecia e fazia com que a sonda alterasse ligeiramente a sua posição;
- No entanto, é possível concluir que se verifica um aquecimento maior no interior da amostra.

Como conclusão sobre a evolução da temperatura do betume aquando da aplicação de radiação de micro-ondas, é possível que o betume atinja temperaturas elevadas num curto intervalo de tempo. Também de realçar que para este tipo de material o uso da potência de 540 Watts revelou-se mais eficaz.

Influência da potência aplicada

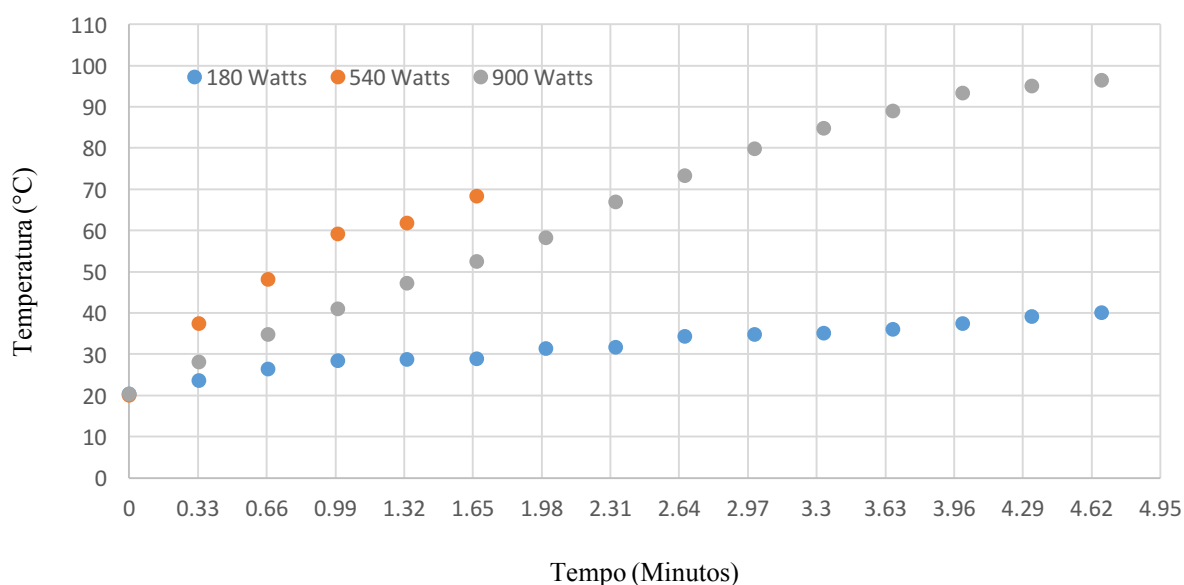


Figura 5.75 - Influência da potência do micro-ondas no aquecimento de betume

Neste caso verificou-se que para o mesmo tempo de aquecimento a utilização da potência média revelou-se mais eficaz, atingindo uma temperatura mais alta que as outras potências utilizadas. No entanto, como já foi dito anteriormente, com o aquecimento os pontos que estavam a ser analisados sofreram alguns desvios, o que faz com que este ensaio não seja tão viável como os outros.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Conclusões

O trabalho efetuado durante a realização desta dissertação de Mestrado em Engenharia Civil veio complementar e enriquecer o conhecimento sobre o aquecimento de misturas betuminosas utilizando radiação de micro-ondas. Embora seja uma técnica que ainda se encontra em desenvolvimento, já existem alguns estudos realizados com o objetivo de ser utilizada em situações reais no âmbito da reabilitação de pavimentos rodoviários.

De acordo com Terrel e Al-Ohaly (1987) o aquecimento de materiais de pavimentação recorrendo a radiação de micro-ondas permite que este se proceda de forma original, mas também que sejam fornecidas propriedades benéficas na maioria das vezes aos materiais e às misturas.

Após a conclusão do trabalho efetuado ao longo desta dissertação, torna-se importante realçar os seguintes fatores:

- Foi evidente que a evolução das temperaturas registadas ao longo de todos os ensaios se procedeu por um comportamento linear, excetuando alguns casos;
- Verificou-se um aquecimento superior na zona extrema do provete, nomeadamente nos pontos com profundidades superiores a 1 cm nos seguintes provetes: provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm, provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm e no provete de mistura betuminosa drenante;
- Em contrapartida ao que foi evidenciado no ponto anterior, verificou-se que o aquecimento era superior na zona central no provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm e no provete de mistura betuminosa modificada com borracha proveniente de pneus usados;
- No que diz respeito ao provete de mistura betuminosa com 17% de vazios, obteve-se um aquecimento maior na zona extrema quando utilizada a potência mínima. No entanto, quando se utilizou a potência média e máxima as temperaturas foram mais elevadas na zona central do provete;

- Quanto ao provete de calcário verificou-se um aquecimento predominante na zona central do provete após conclusão dos ensaios, embora quando foi utilizada a potência média o ponto que obteve a temperatura mais elevada foi o ponto situado na zona extrema a maior profundidade;
- Relativamente ao provete de basalto obteve-se valores contrários aos verificados nos provetes restantes, nomeadamente o facto de a temperatura à superfície ser maior do que as temperaturas registadas no interior do provete. Relativamente aos pontos no interior do provete, os que estavam na zona central registaram temperaturas maiores que os situados na zona extrema;
- Comparando o tempo necessário para que as misturas betuminosas atingissem altas temperaturas utilizando as duas técnicas evidenciadas nesta dissertação, isto é, aquecimento por micro-ondas e aquecimento convencional em estufa, verificou-se ganhos mínimos de 20 minutos, quando utilizada a técnica de aquecimento por radiação de micro-ondas;
- Em relação aos agregados que foram submetidos a radiação de micro-ondas torna-se relevante relatar que o agregado maior consegue obter temperaturas elevadas num tempo inferior, quando comparado com o tempo que o agregado menor necessitava para atingir a mesma temperatura;
- Em relação ao betume foi evidente um maior aquecimento nos pontos colocados a profundidades superiores a 1 cm. É também de relevo enunciar que é possível obter temperaturas na ordem dos 100 °C em menos de 5 minutos de radiação;
- Por fim, o uso de potências médias revelou-se mais eficaz, uma vez que a influência do uso de potências elevadas não revelou grandes ganhos de temperatura como seria de esperar.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Com o estudo efetuado nesta dissertação de Mestrado evidenciaram-se alguns aspetos importantes sobre o aquecimento de misturas betuminosas recorrendo a micro-ondas, que num futuro próximo poderão vir a ser aprofundados. Através dos resultados obtidos tornou-se

possível o enriquecimento do conhecimento sobre o uso desta técnica, sendo que agora é necessário proceder à continuidade dos trabalhos já efetuados.

Posto isto, é relevante enunciar que o aquecimento realizado através de radiação de micro-ondas deve ser visto como um melhoramento da tecnologia, que permite a utilização de técnicas e materiais que de outro modo não seriam possíveis utilizando processos convencionais.

O aquecimento por micro-ondas de materiais utilizados na pavimentação deve ser considerado um método alternativo que é apropriado para aplicações especiais. Por exemplo, a construção de uma plataforma tipo túnel poderia ser um passo importantíssimo no uso desta tecnologia, uma vez que se tornava possível operar em grandes áreas urbanas com pouca poluição do ar, e servir como uma melhor abordagem para a reciclagem de pavimentos, uma vez que se trata de uma área mais requisitada do que a construção nova. Este instrumento poderia ser utilizado em grandes trabalhos de reciclagem de pavimentos, no entanto para pequenas reparações a criação de um aparelho semelhante a um aspirador, com capacidade de produzir micro-ondas, poderia ser um bom projeto de futuro.

Relativamente à continuação do estudo do aquecimento de misturas betuminosas recorrendo a micro-ondas, a realização de modelos numéricos, nomeadamente o método dos elementos finitos, poderia ser um grande passo com vista a perceber melhor como se procede o aquecimento no interior de misturas betuminosas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AI, 1981. Thickness design – asphalt pavements for highways and streets. Asphalt Institute (AI), Manual séries nº 1 (MS-1), Maryland.
- Asphalt Institute, 1983. Asphalt technology and construction practices. Asphalt Institute, ES - 1, Maryland.
- Azevedo, M. D., (1999). “Gestão da Conservação de Pavimentos – As Técnicas de Reabilitação Estrutural dos Pavimentos”. Centro Rodoviário Português (C.R.P). Lisboa.
- Barbosa, Luís F. R. Ferreira (1984) – O dimensionamento de pavimentos flexíveis, de estradas aeródromos e dos seus reforços – Dissertação apresentada à Universidade Nova de Lisboa para a obtenção de mestre em Mecânica dos Solos – Lisboa.
- Barboza, A. C. R. N.; Cruz, C. V. M. S.; Graziani, M. B.; Lorenzetti, M. C. F.; Sabadini, E.; Quim. Nova 2001, 24, 901.
- Benedetto, A., & Calvi, A. (2013). A pilot study on microwave heating for production and recycling of road pavement materials. Construction and Building Materials, 44, 351-359.
- Branco, F., Pereira, P. & Santos, L.P., 2011. *Pavimentos Rodoviários* 4th ed. Almedina, ed., Coimbra.
- CE EP (2014). Caderno de Encargos Tipo Obra.14.03 – Pavimentação. Estradas de Portugal S. A. (EP). Almada.
- Daniel JS, Kim YR. Laboratory evaluation of fatigue damage and healing of Asphalt mixtures. J Mater Civ Eng 2001;13(6):434-40.
- Epps, Amy L.– “Thermal behavior of crumb-rubber modified asphalt concrete mixtures”. Dissertation series UCB-ITS-DS-97-2. Institute of Transportation Studies, University of California at Berkeley. ISBN 0192 4109, 1997.

- Ferreira, A. P. A. (2011). “Incorporação de fibras da reciclagem de pneus em misturas betuminosas”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.
- FP2, Foundation for Pavement Preservation, Pavement Preservation Today, VOL.2, nº1, Summer 2001, Virginia (2001).
- Francisco, A. P. S. (2012). “Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis”. Relatório Final de Projeto em Engenharia da Construção. Escola Superior de Tecnologia e de Gestão Instituto Politécnico de Bragança.
- Freitas, E., Pereira, P. (2001). Estudo da Evolução do Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis, Revista Engenharia Civil, Universidade do Minho, Vol. n.º 11, pp. 47-58.
- Gallego, J., Miguel, A., Contreras, V., & Páez, A. (2013). Heating Asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing. Construction and Building Materials, 42, 1-4.
- García Álvaro, Schlangen Erik, van de Ven Martin, Liu Quantao. Electrical conductivity of Asphalt mortar containing conductive fibers and fillers. Construct Build Mater 2009; 23(10):3175-81.
- Inir. (2012). Diretivas para a concepção de pavimentos - Critérios de Dimensionamento de Pavimentos, 18.
- JAЕ (atual IEP), 1985. 2º Plano Rodoviário Nacional.
- JAЕ (atual IEP), 1998. Plano Rodoviário Nacional 2000.
- Jaselskis EJ, Grigas J, Brilingas A. Dielectric properties of Asphalt pavement. J Mater Civ Eng 2003; 15:427-34.
- Jeppson MR. (1981). Microwave method and apparatus for heating pavements.
- Kraemer, C.; Val, M, 1996. Caminos e Aeropuertos: firmes e pavimentos. Departamento de Transportes – E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidade Politecnica de Madrid, Madrid.

- Little DN, Bhasin A. Exploring mechanisms of healing in Asphalt mixtures and quantifying its impact. In: van der Zwaag S, editor. Self healing materials an alternative approach to 20 centuries of materials science. Springer series in materials science, vol. 100; 2007. P. 205-18.
- Liu, Q., Schlangen, E., García, Á., & Ven, M. Van De. (2010). Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1207-1213.
- Manuel de Conceção de Pavimentos para a rede rodoviário Nacional (MACOPAV), Julho de 1995;
- Mendes, S. F. (2011). “Caracterização mecânica de misturas betuminosas a aplicar em infraestruturas de transportes”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Minhoto, M. J. (2005). “Consideração da Temperatura no Comportamento à reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Guimarães.
- Miranda, T. (2012). Apontamentos teóricos da disciplina de Geologia de Engenharia Civil – Ciclo Geológico e Tipos de Rochas. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.
- Miranda, T. (2012). Apontamentos teóricos da disciplina de Geologia de Engenharia Civil – Os principais minerais constituintes Alteração dos maciços rochosos. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.
- NP EN 13108 – 1: 2011. Misturas betuminosas. Especificações dos materiais. Parte 1: Betão betuminoso. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Portugal.
- Oliveira, J. (2013). Apontamentos teóricos da disciplina de Gestão da Conservação de Estradas – Degradações dos Pavimentos Rodoviários. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.

- Oliveira, J. (2013). Apontamentos teóricos da disciplina de Gestão da Conservação de Estradas – Técnicas de Conservação e de Reabilitação de Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.
- Pais, J. (1999). “Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.
- Pais, J. (2015). Apontamentos teóricos da disciplina de Pavimentos Rodoviários – Constituição e Modo de Comportamento dos Pavimentos Rodoviários. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.
- Pais, J. (2015). Apontamentos teóricos da disciplina de Pavimentos Rodoviários – Materiais para pavimentação rodoviária. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.
- Peinsitt T, Kuchar F, Hartlieb P, Moser P, Kargl H, Restner U, et al. Microwave heating of dry and water saturated basalt, granite and sandstone. *Int J Min Miner Eng* 2010; 2:18-29.
- Pereira, P. & Miranda, V., 1999. Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários, Braga.
- Pereira, P. A. A., Pais, J. C., Freitas, E. F., Silva, H. M. D., & Oliveira, J. R. M. (2007). - A reabilitação da rede rodoviária no século XXI, 19–36.
- Pinto, I. B. R. (2003). “Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários”. Dissertação de Mestrado em Vias de Comunicação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Reis, N. F. S. (2009). “Análise Estrutural de Pavimentos Rodoviários, Aplicação a um Pavimento Reforçado com Malha de Aço”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa.
- Rosini, F.; Nascentes, C. C.; Química, D. De, Federal, U., Carlos, D. S., & Sp, S. C. (2004). *Educação*, 27(6), 1012-1015.
- Silva, D. (2014). “Avaliação da sustentabilidade de diferentes soluções de reabilitação de pavimentos urbanos betuminosos”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.

- Terrel, R. L., and A. Al-Ohaly. "Microwave Heating of Asphalt Paving Materials." *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.* Vol. 56. 1987.
- Ulaby FT, Bengal TH, Dobson MC, East JR, Garvin JB, Evans DL. Microwave dielectric properties of dry rocks. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 1990; 28:325-36.
- Vicente, A. M. (2006). "A utilização de Betumes Modificados com Borracha na Reabilitação de Pavimentos Flexíveis". Dissertação de Mestrado em Vias de Comunicação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Watkins, K. W. (N.D.). Heating in Microwave Ovens An Example of Dipole Moments In Action, (3).
- Wu S, Liu X, Ye Q, Li N. Self-monitoring electrically conductive Asphalt-based composite containing carbon fillers. *Trans Nonferr Met Soc China* 2006; 16:512-6.

SITES CONSULTADOS

- 1 - <http://www.coladaweb.com/curiosidades/forno-de-micro-ondas-como-funciona>
- 2 - https://pt.wikipedia.org/wiki/Forno_de_micro-ondas#Origem_e_hist.C3.B3ria
- 3 - https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/termometro-pce-instruments-term_metro-pce-ir-52-det_5638935.htm?_list=kat&_listpos=32
- 4 - <https://pt.wikipedia.org/wiki/Granito>
- 5 - <https://pt.wikipedia.org/wiki/Basalto>
- 6 - <http://www.datataker.com/DT800.php>

ANEXOS

Análise da evolução da temperatura à superfície através do termómetro Calex Soft

Provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm

- 180 Watts

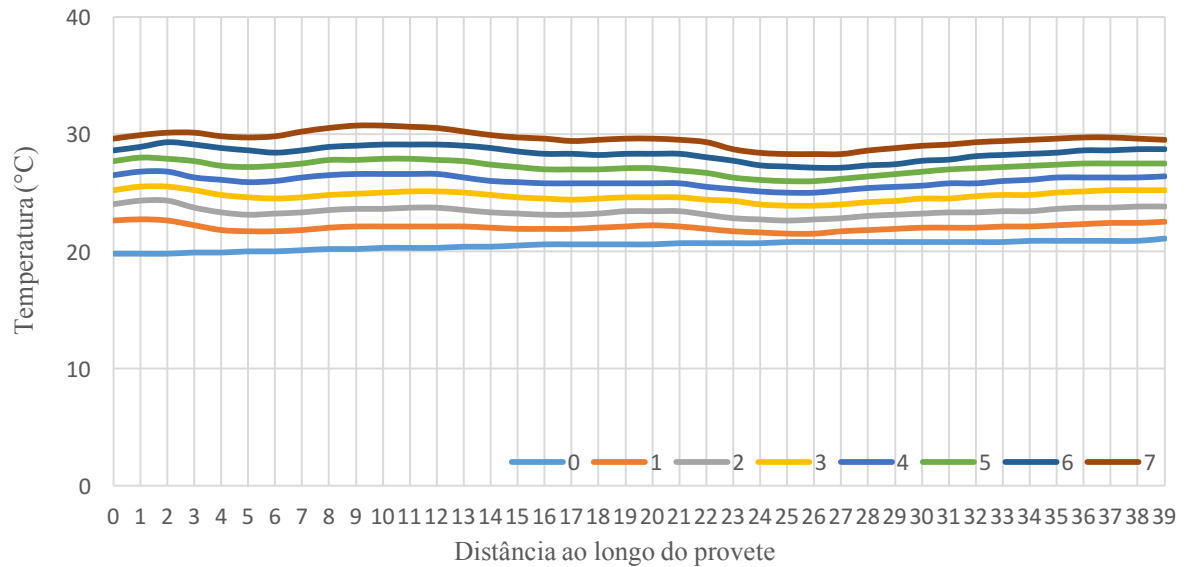


Figura A.1 - Evolução da temperatura do perfil 1 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

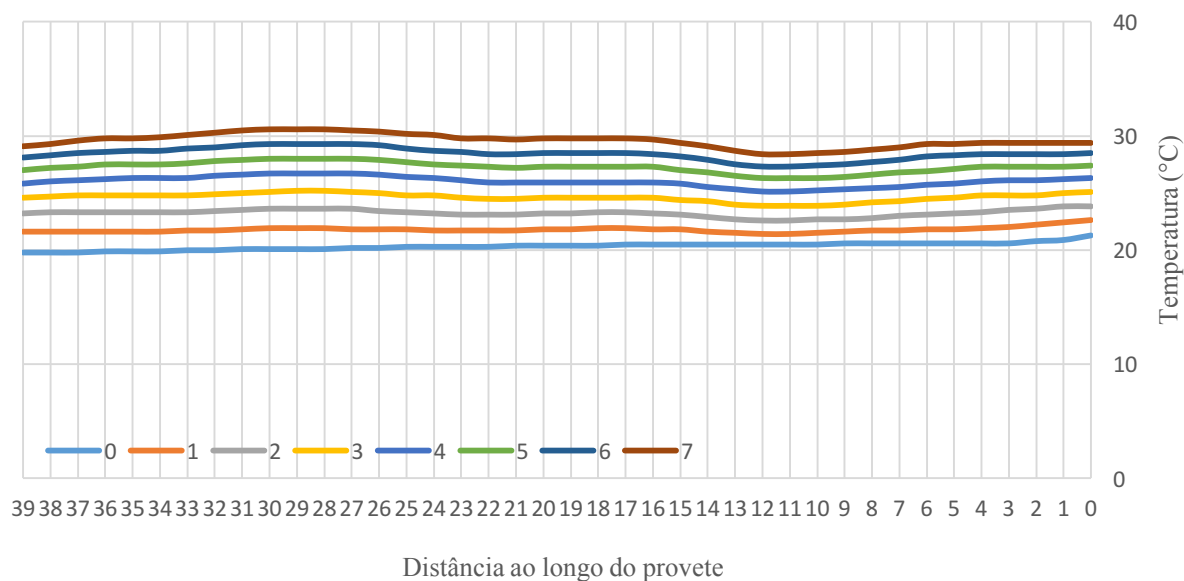


Figura A.2 - Evolução da temperatura do perfil 2 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Callex Soft

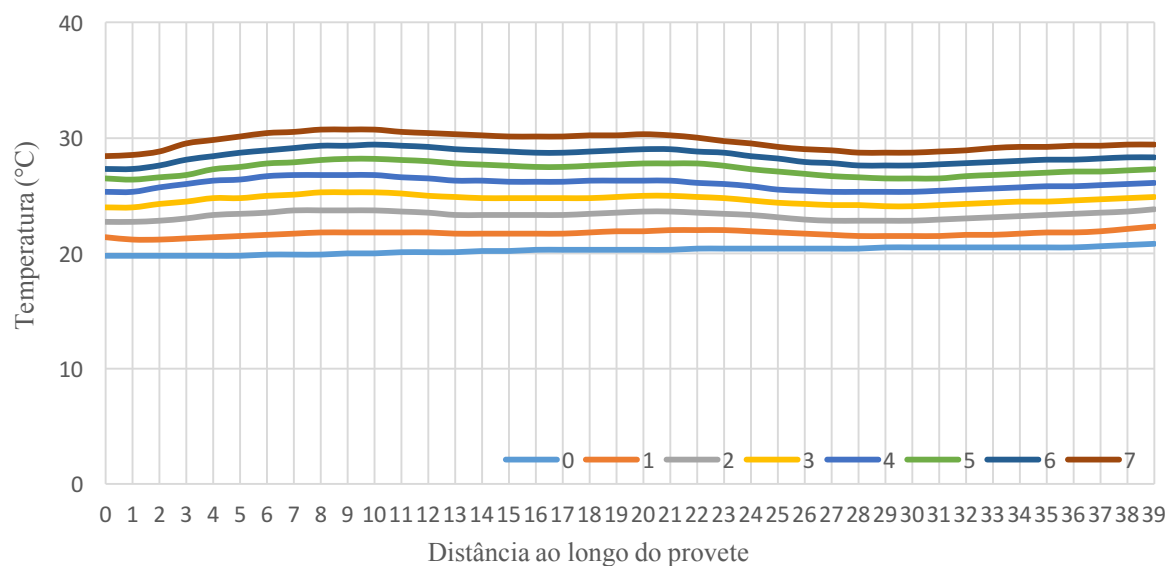


Figura A.3 - Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Callex Soft

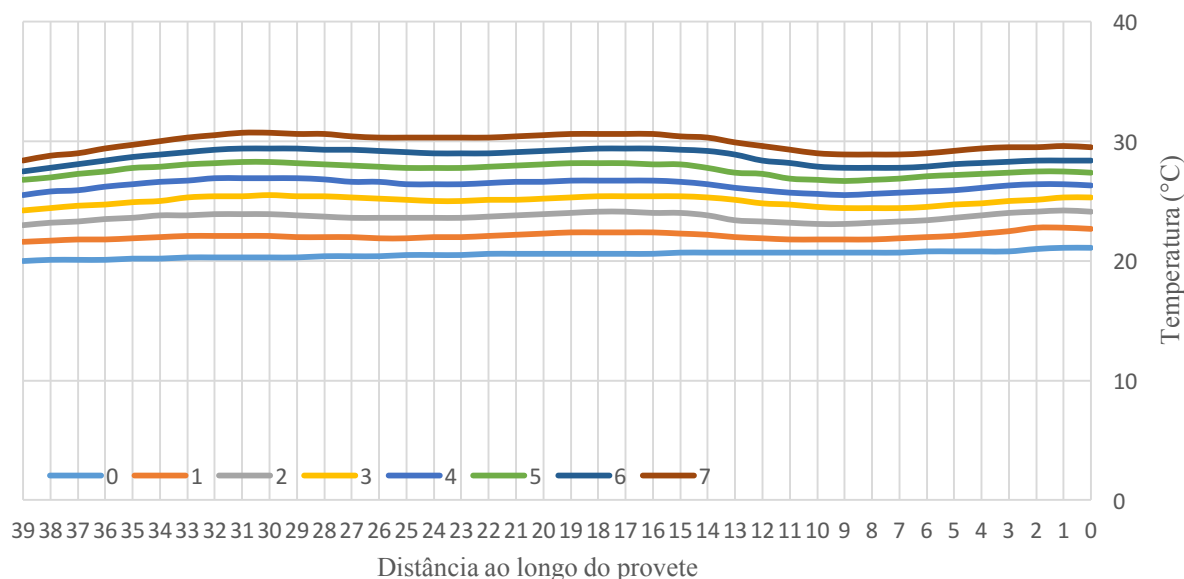


Figura A.4 - Evolução da temperatura do perfil 4 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Callex Soft

- 540 Watts

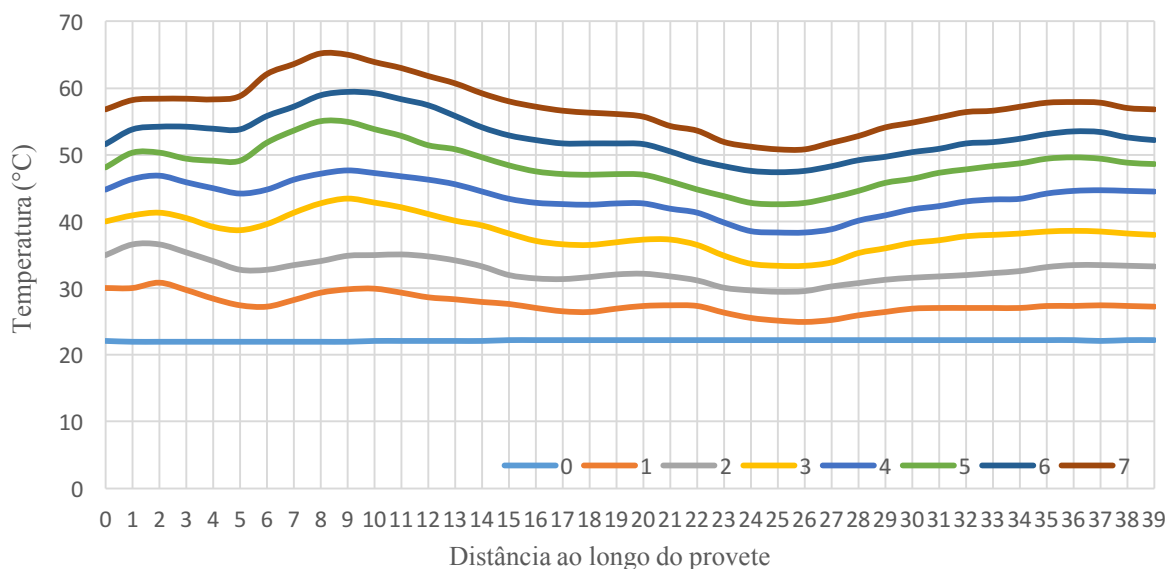


Figura A.5 - Evolução da temperatura do perfil 1 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Callex Soft

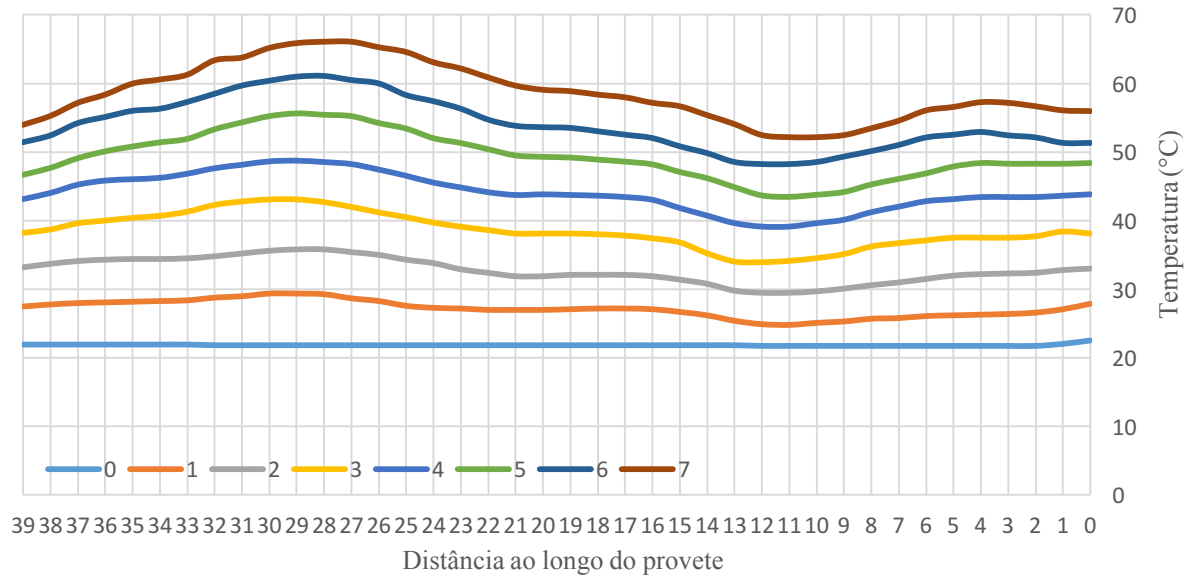


Figura A.6 - Evolução da temperatura do perfil 2 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

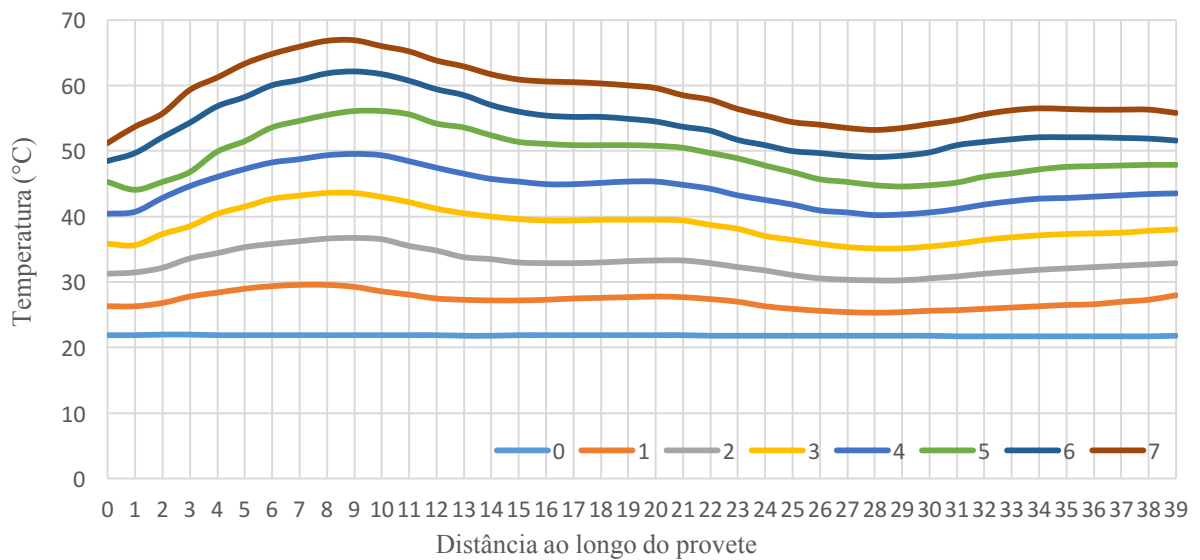


Figura A.7 - Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

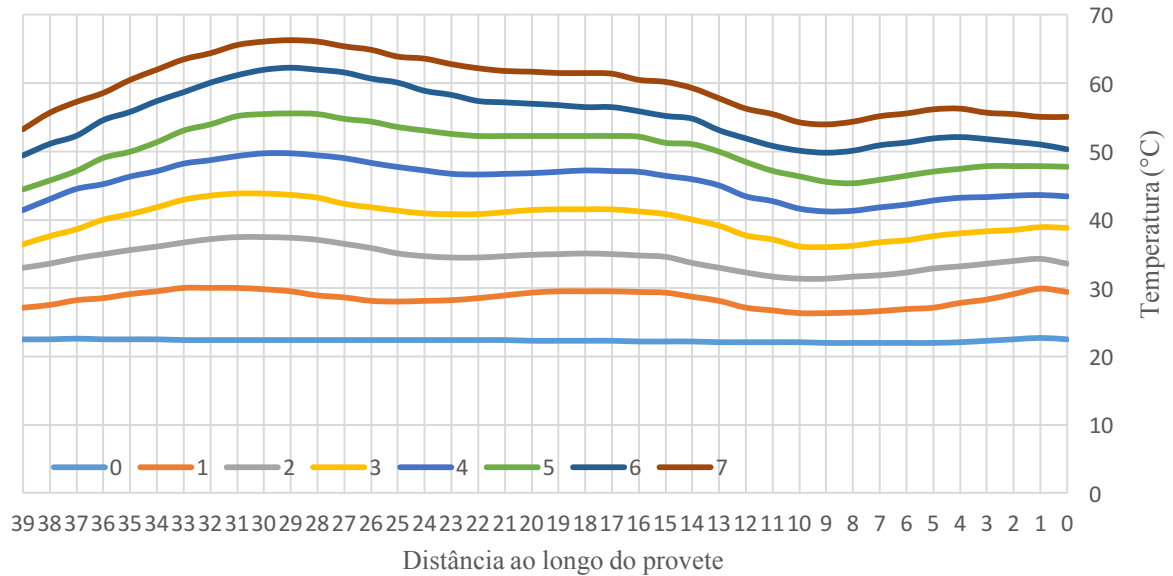


Figura A.8 - Evolução da temperatura do perfil 4 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

- 900 Watts

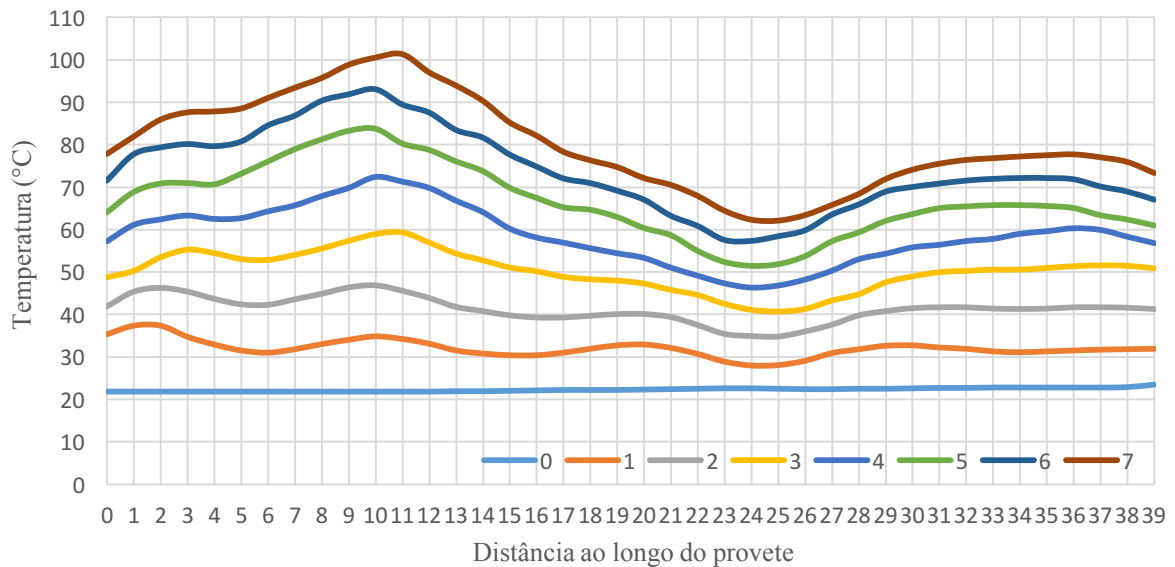


Figura A.9 - Evolução da temperatura do perfil 1 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

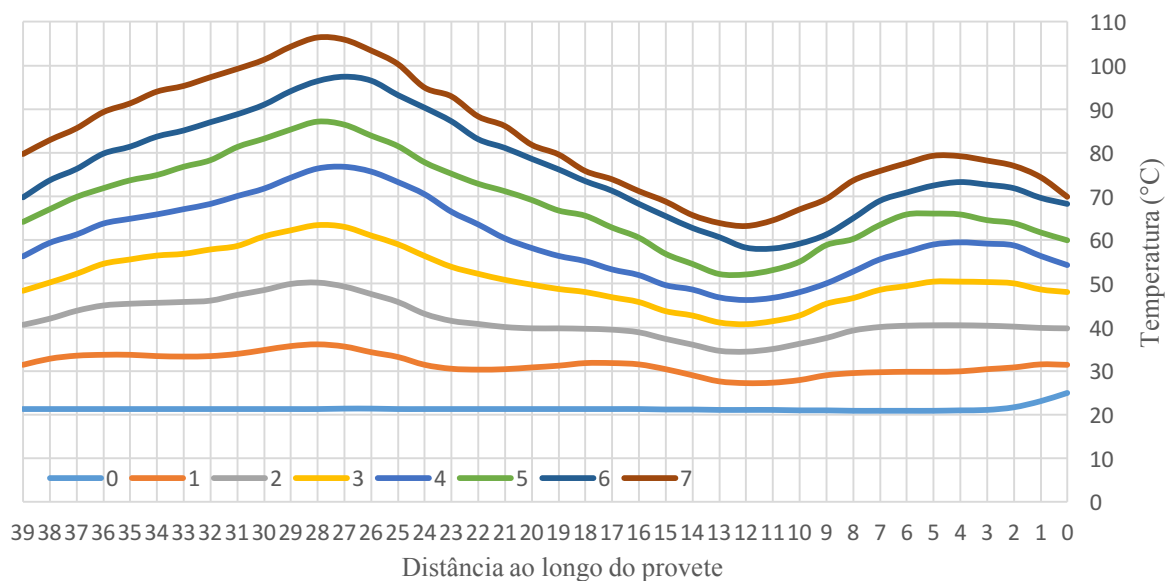


Figura A.10 - Evolução da temperatura do perfil 2 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

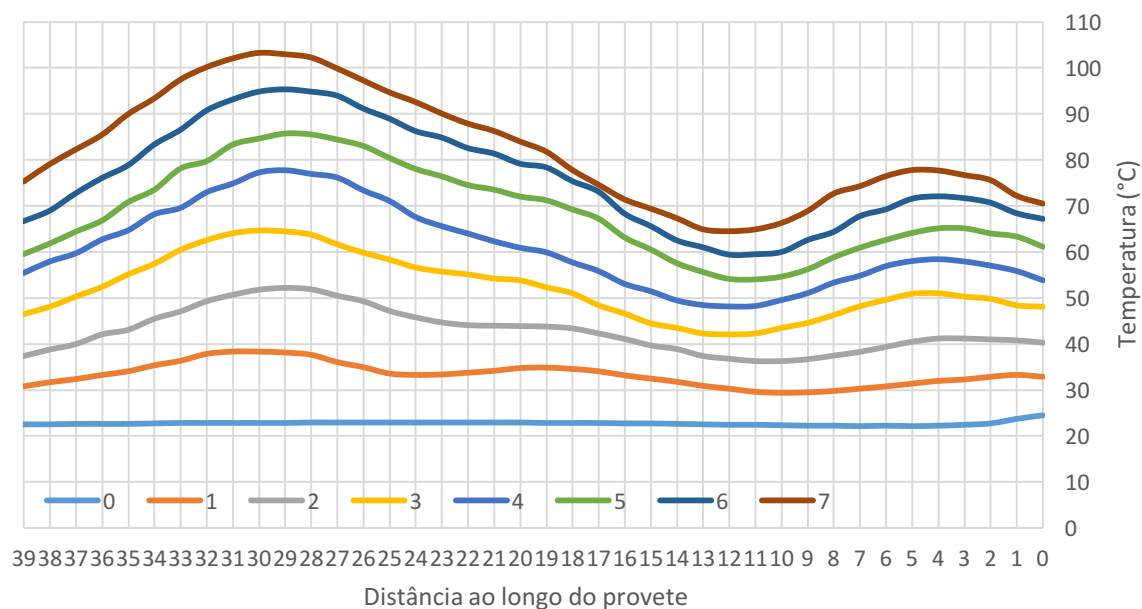


Figura A.11 - Evolução da temperatura do perfil 4 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 14 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

Provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm

- 180 Watts

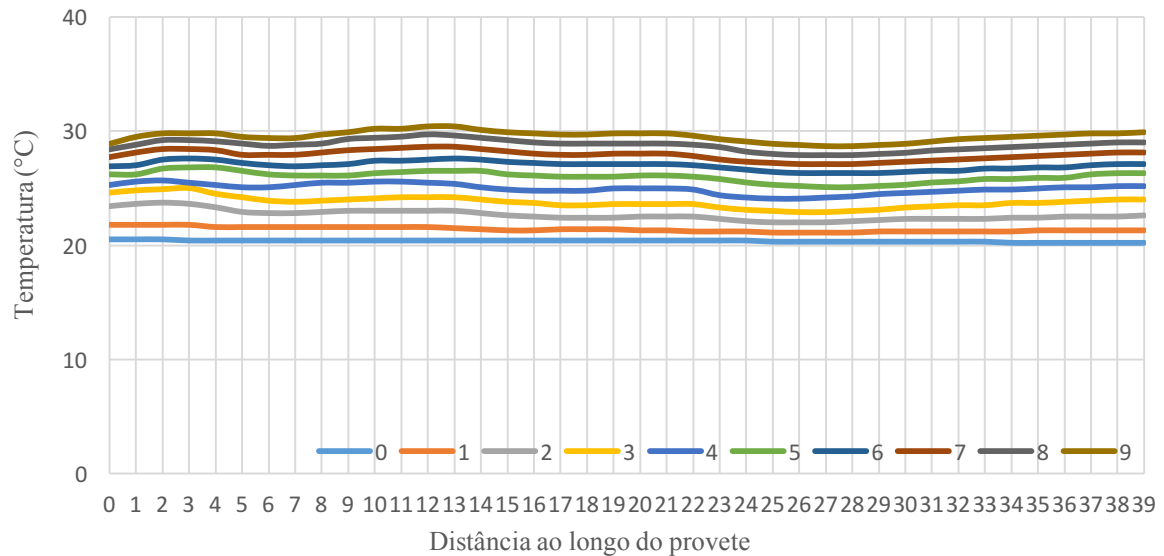


Figura A.12 - Evolução da temperatura do perfil 1 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

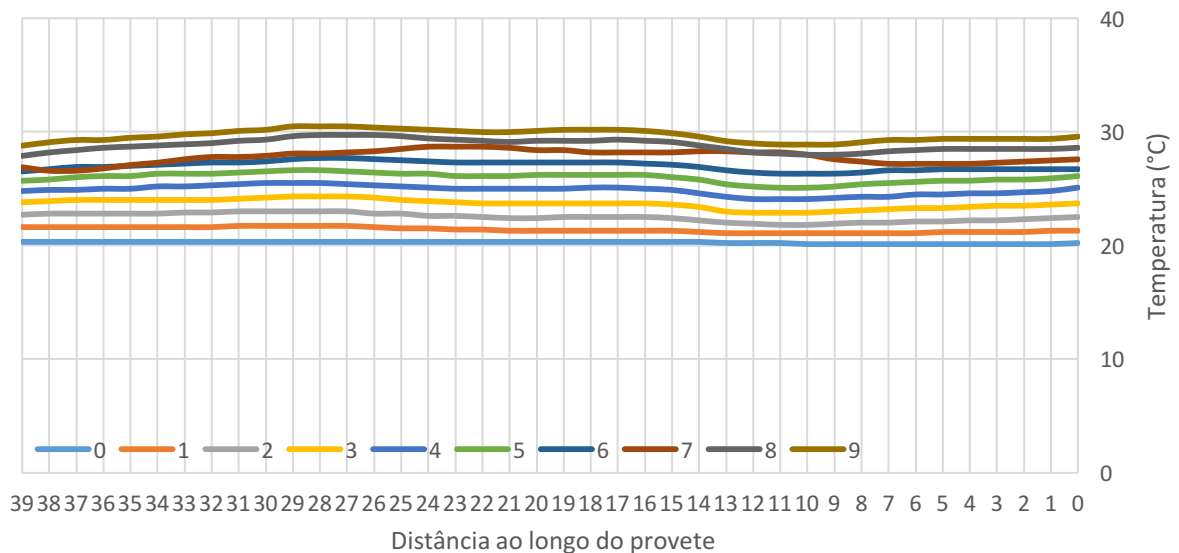


Figura A.13 - Evolução da temperatura do perfil 2 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

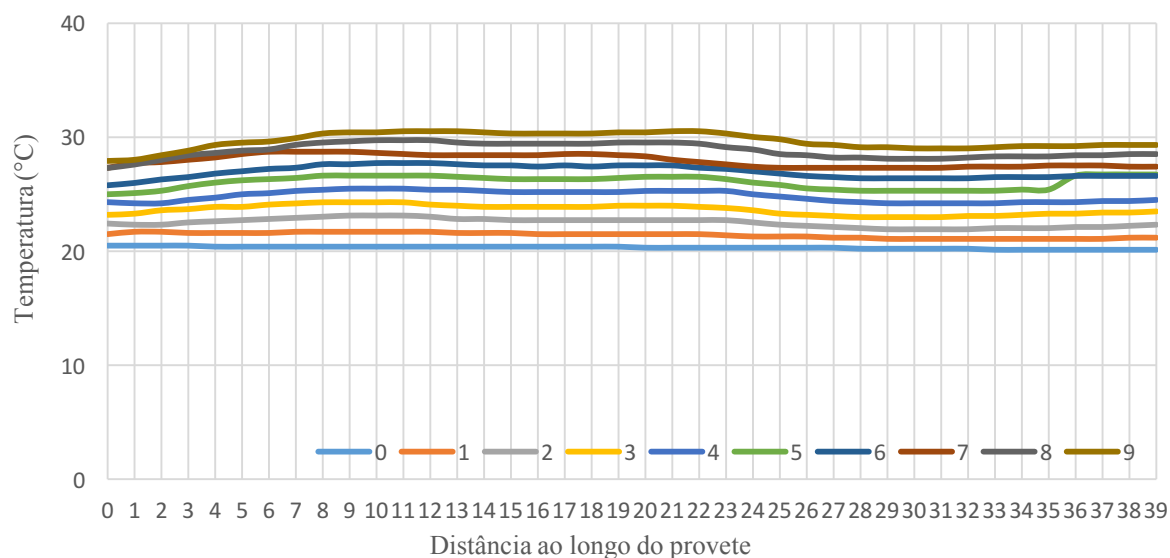


Figura A.14 - Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Callex Soft

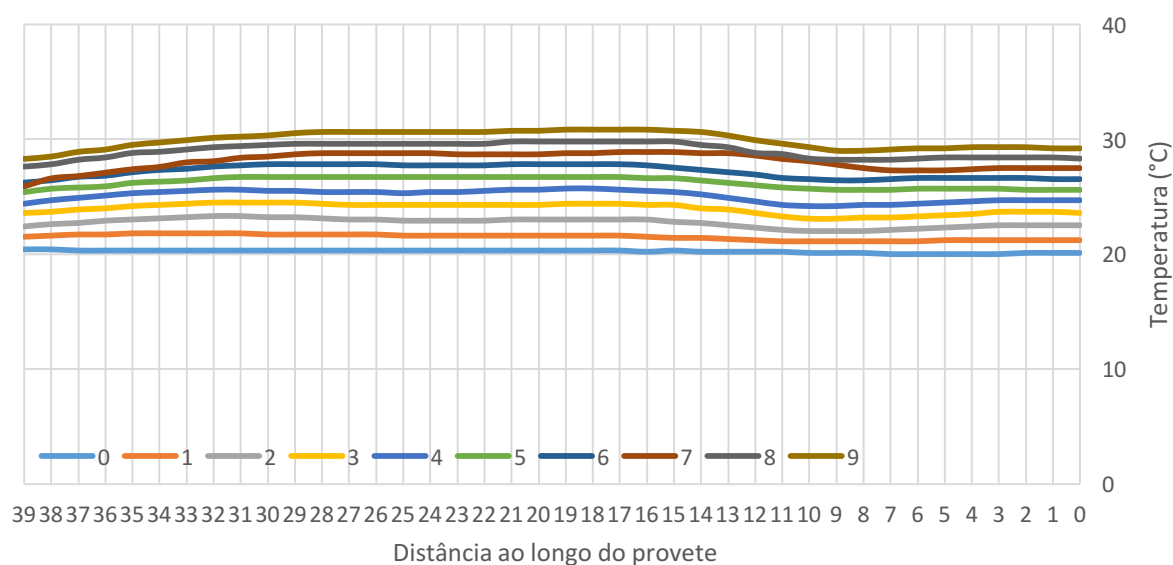


Figura A.15 - Evolução da temperatura do perfil 4 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Callex Soft

- 540 Watts

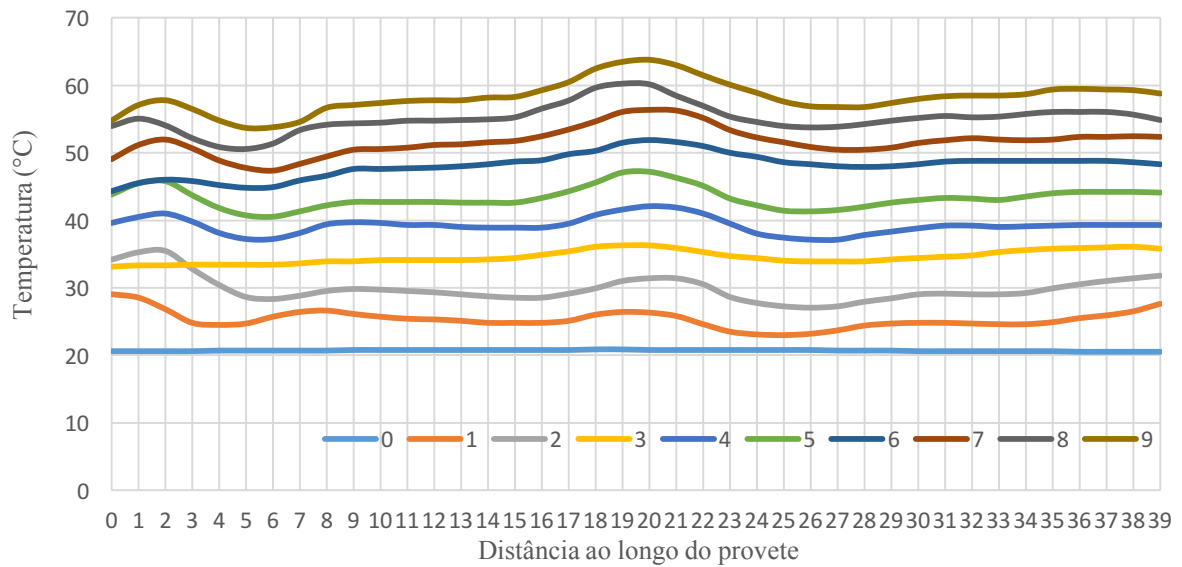


Figura 2.16 - Evolução da temperatura do perfil 1 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Callex Soft

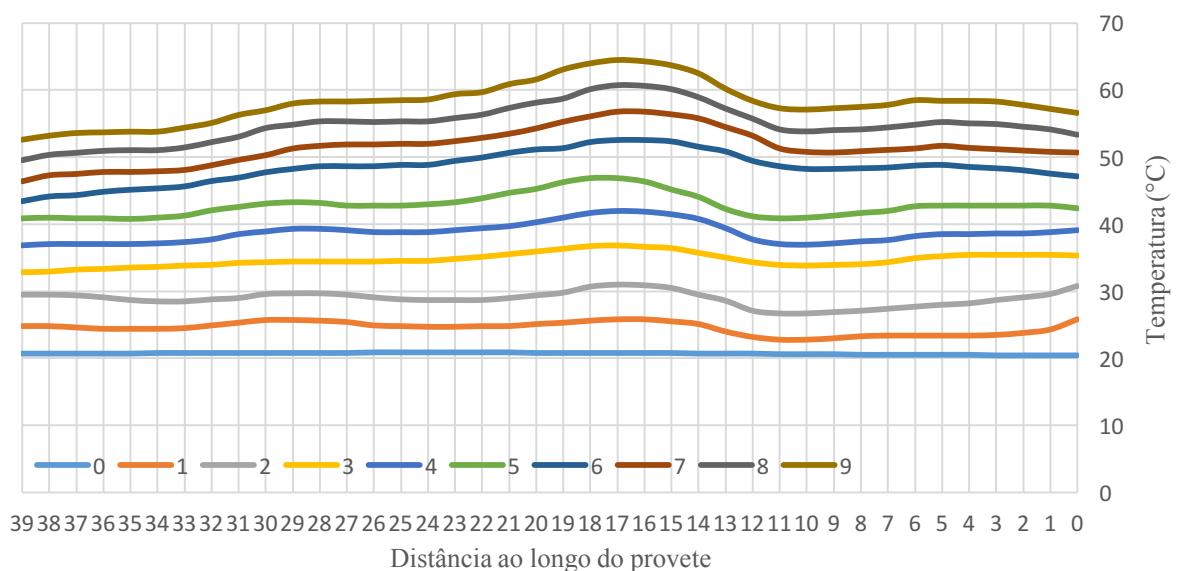


Figura A.17 - Evolução da temperatura do perfil 2 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Callex Soft

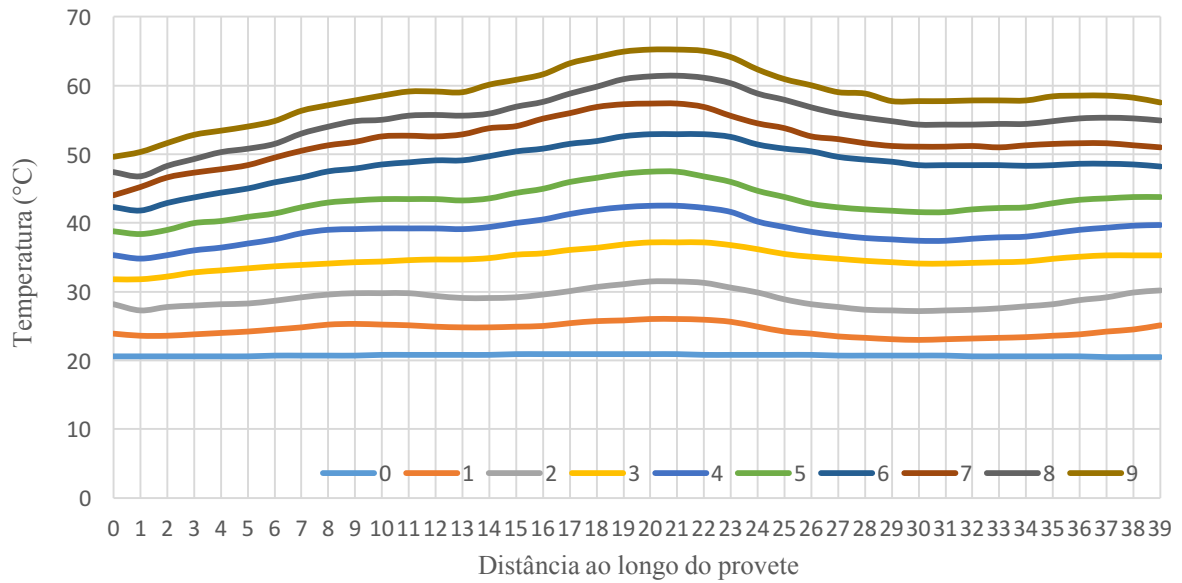


Figura A.18 - Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

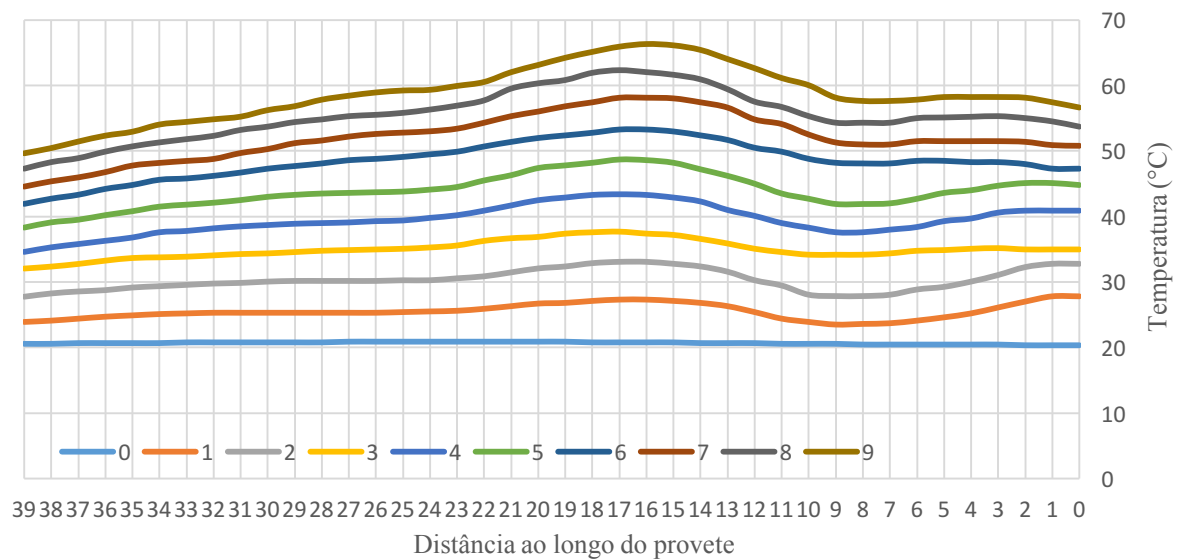


Figura A.19 - Evolução da temperatura do perfil 4 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

- 900 Watts

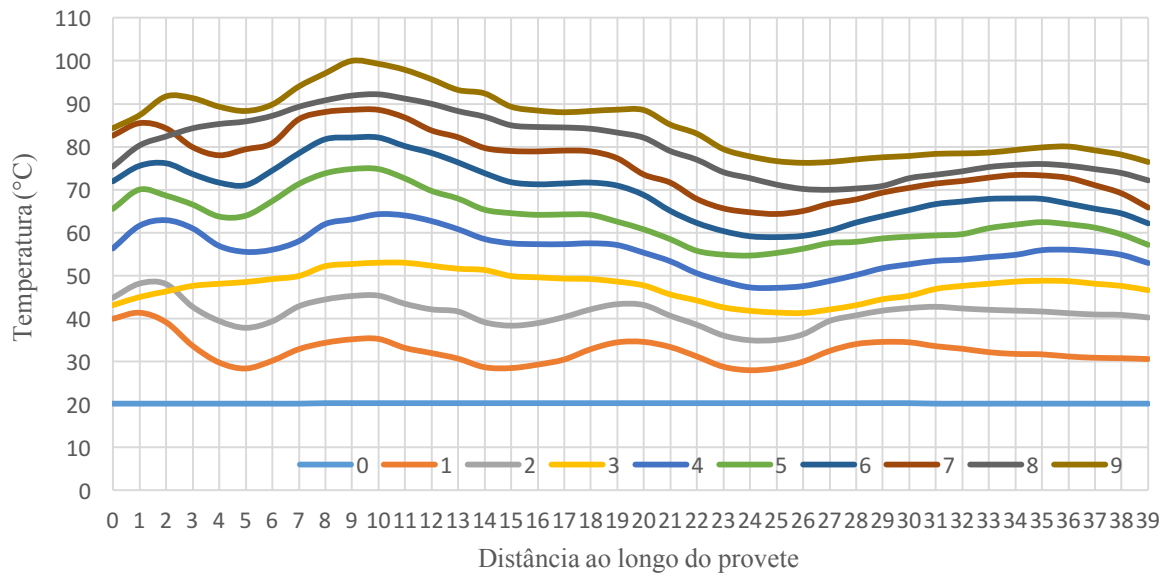


Figura A.20 - Evolução da temperatura do perfil 1 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

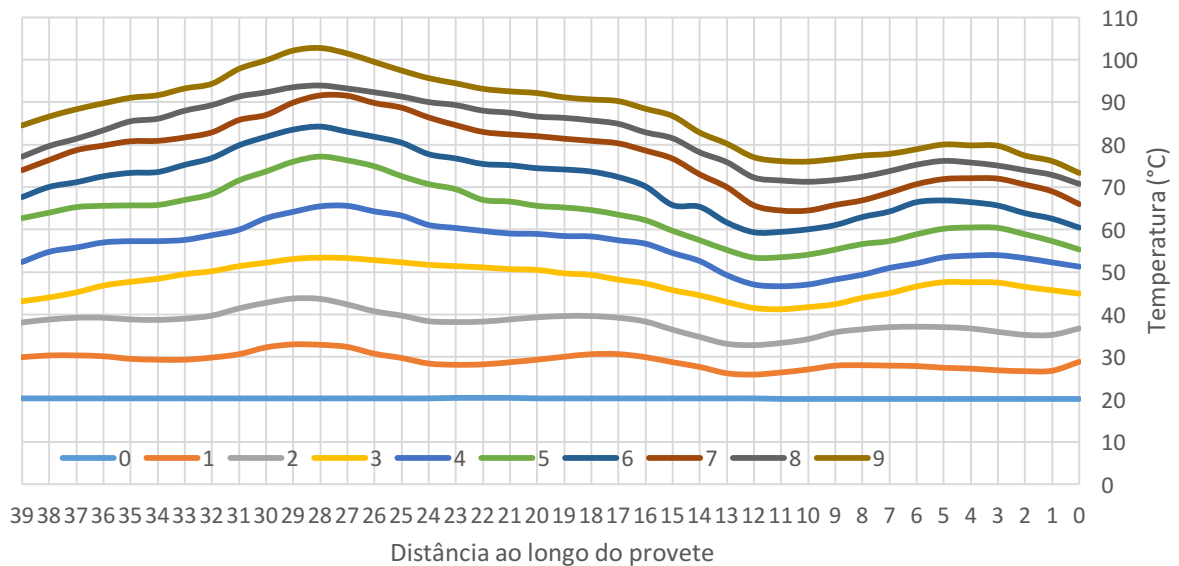


Figura A.21 - Evolução da temperatura do perfil 2 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

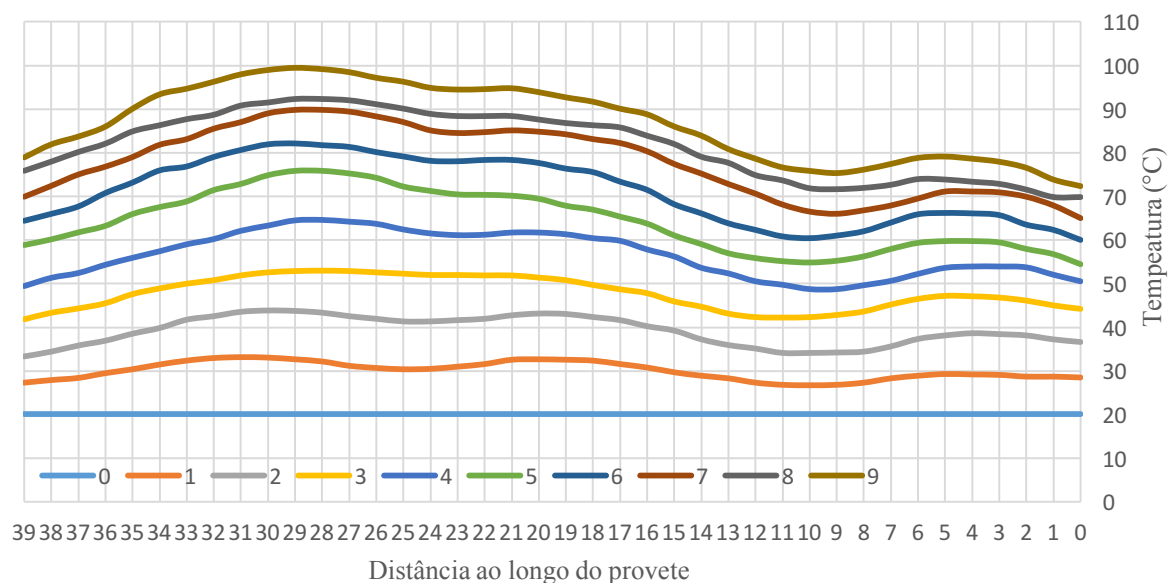


Figura A.22 - Evolução da temperatura do perfil 4 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 16 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

Provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm

- 180 Watts

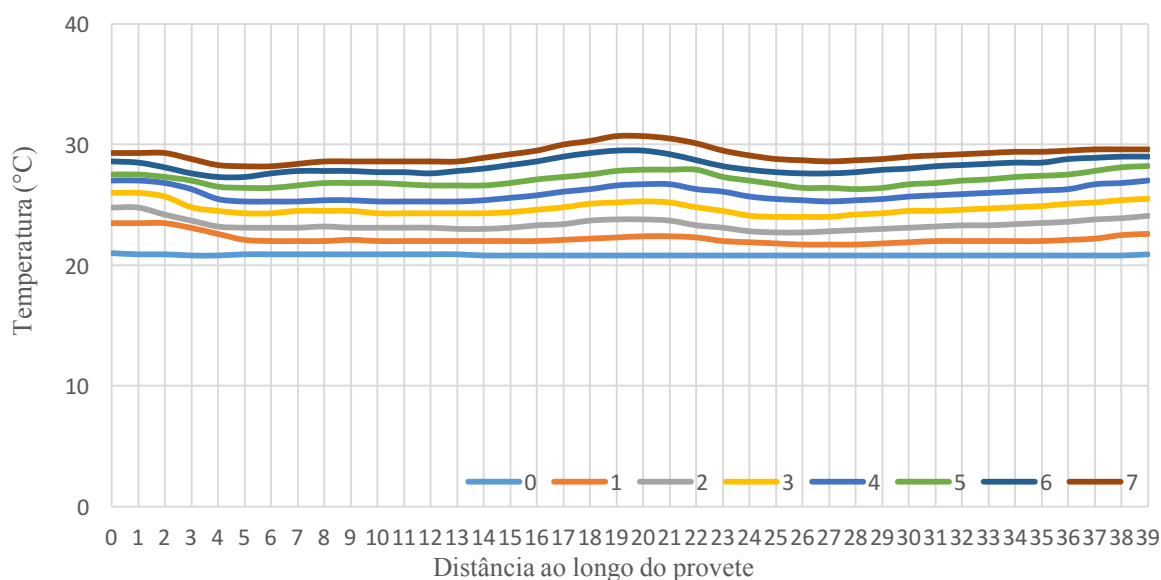


Figura A.23 - Evolução da temperatura do perfil 1 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

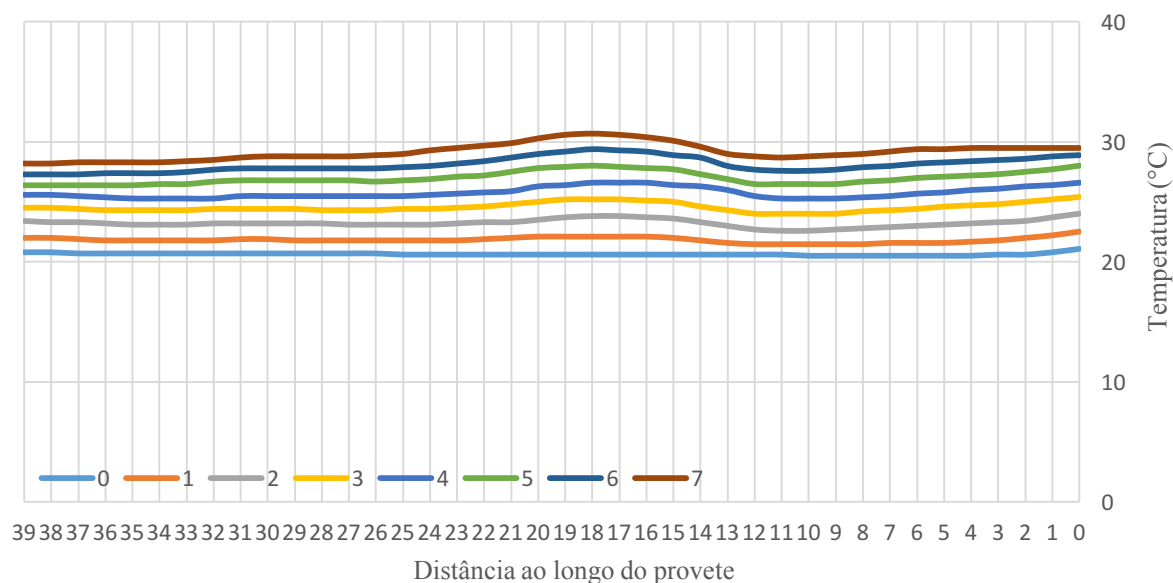


Figura A.24 - Evolução da temperatura do perfil 2 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Callex Soft

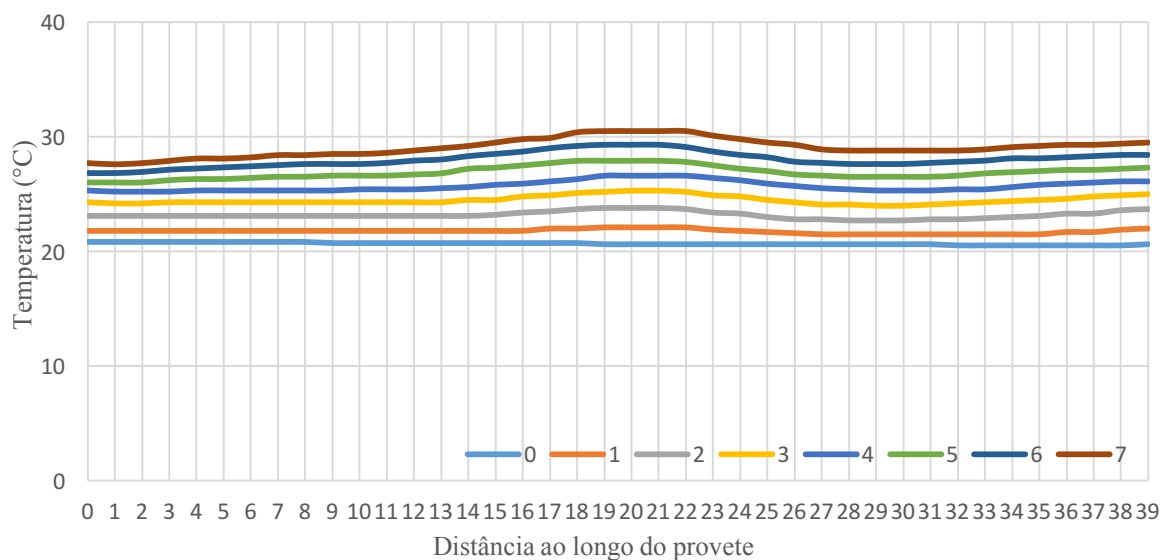


Figura A.25 - Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Callex Soft

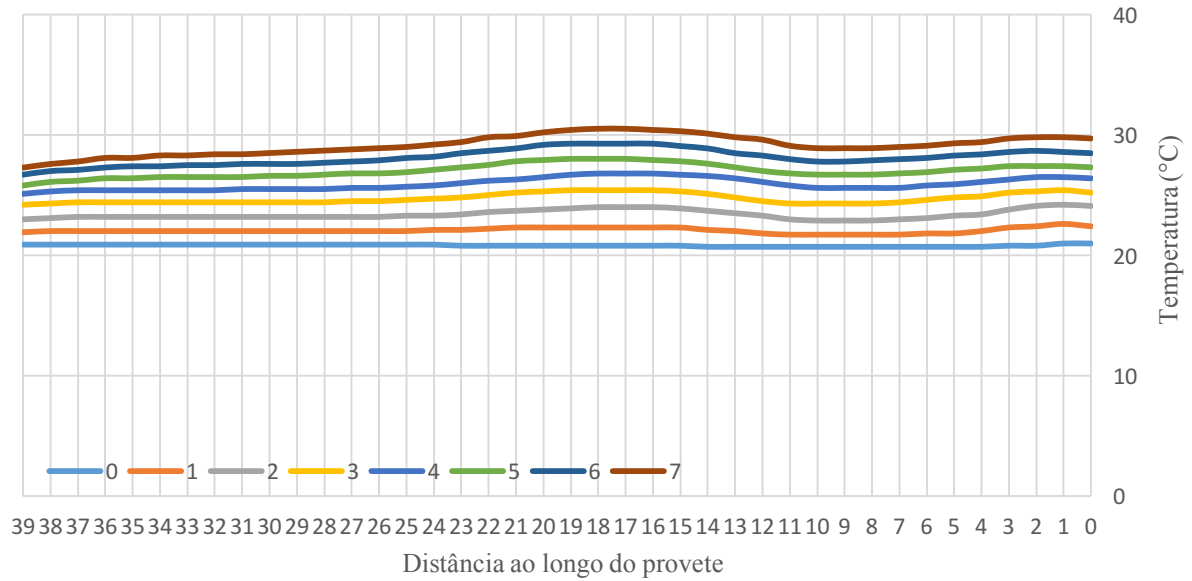


Figura A.26 - Evolução da temperatura do perfil 4 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

- 540 Watts

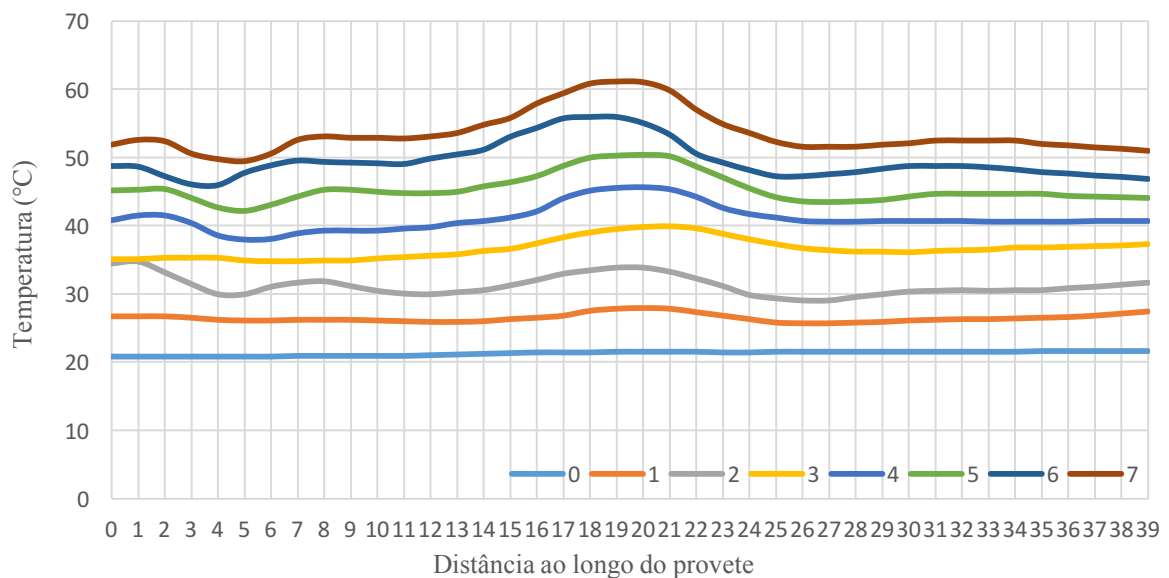


Figura A.27 - Evolução da temperatura do perfil 1 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

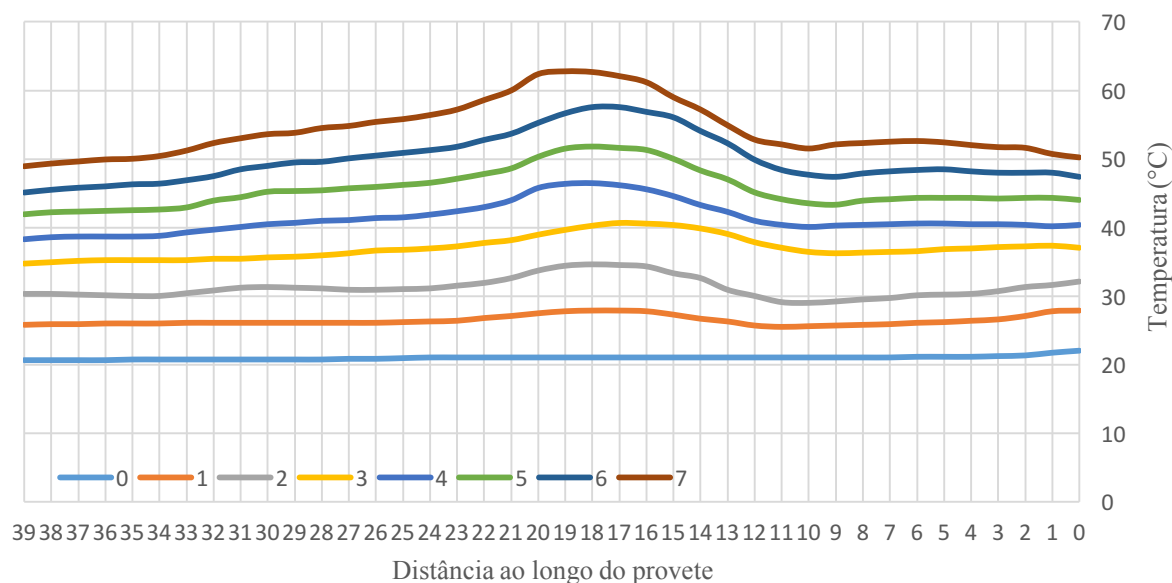


Figura A.28 - Evolução da temperatura do perfil 2 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

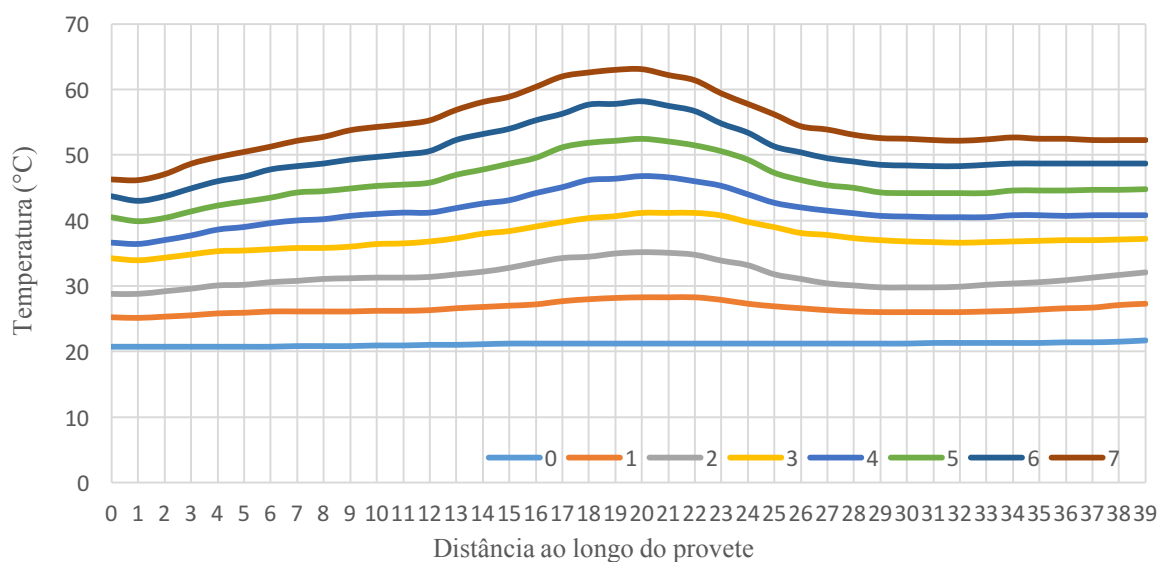


Figura A.29 - Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

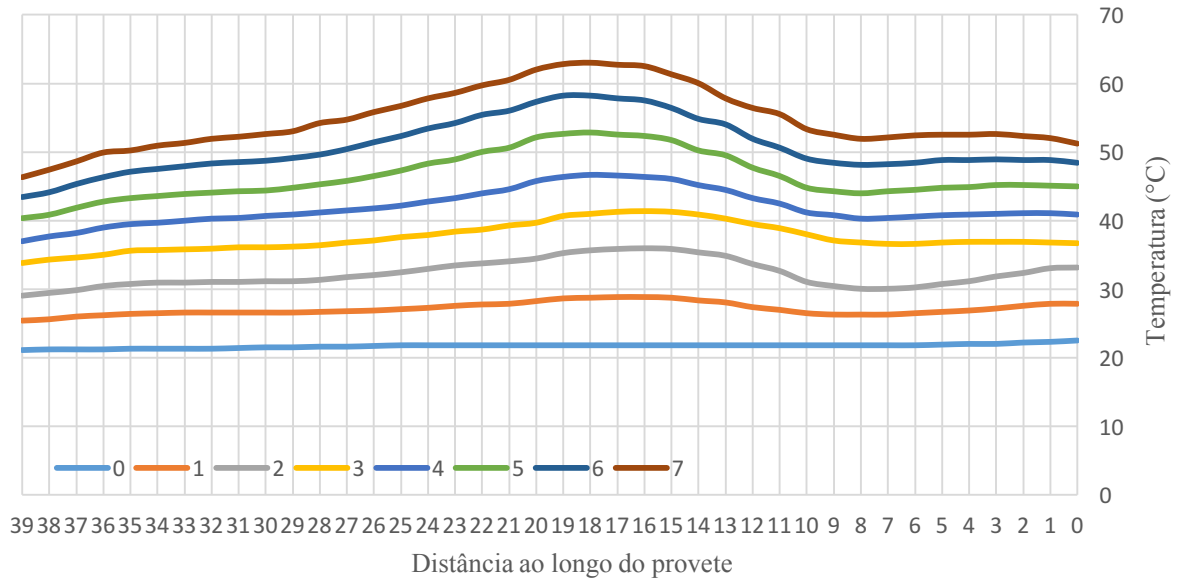


Figura A.30 - Evolução da temperatura do perfil 4 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

- 900 Watts

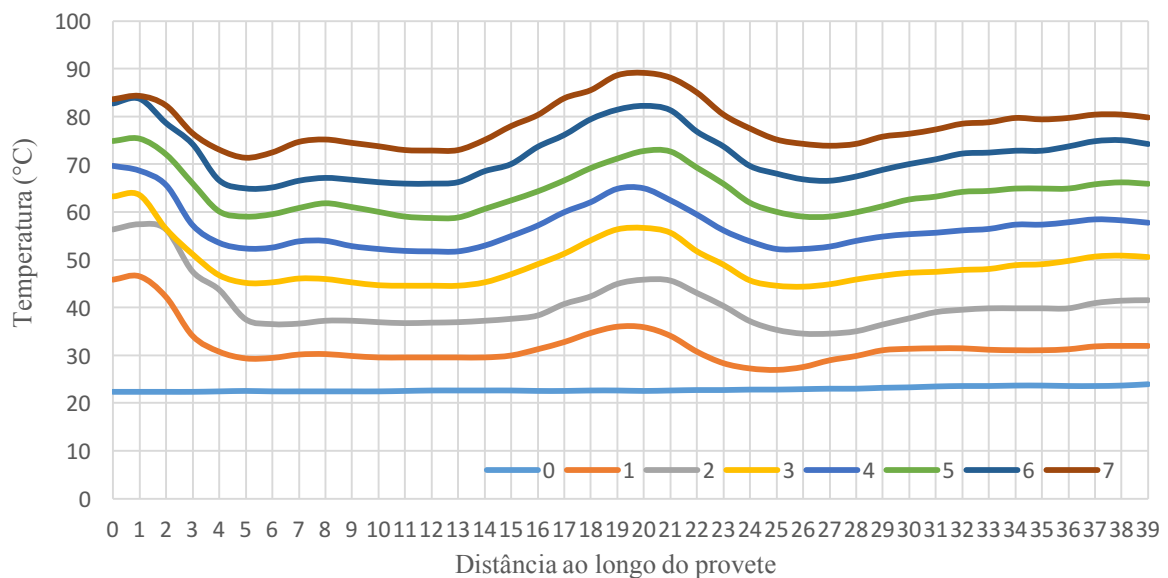


Figura A.31 - Evolução da temperatura do perfil 1 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

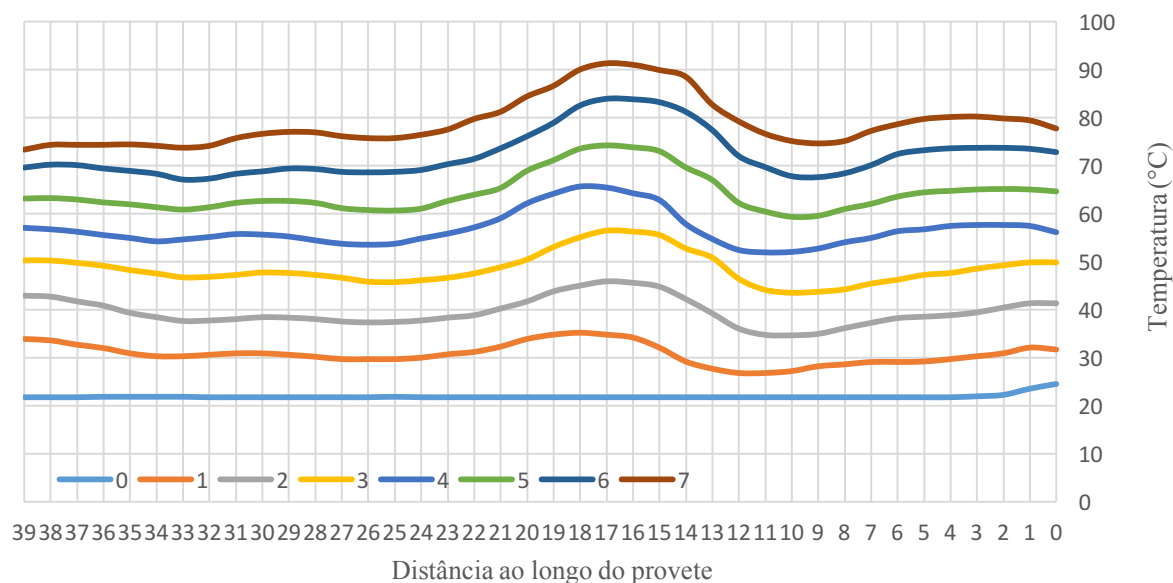


Figura A.32 -Evolução da temperatura do perfil 2 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

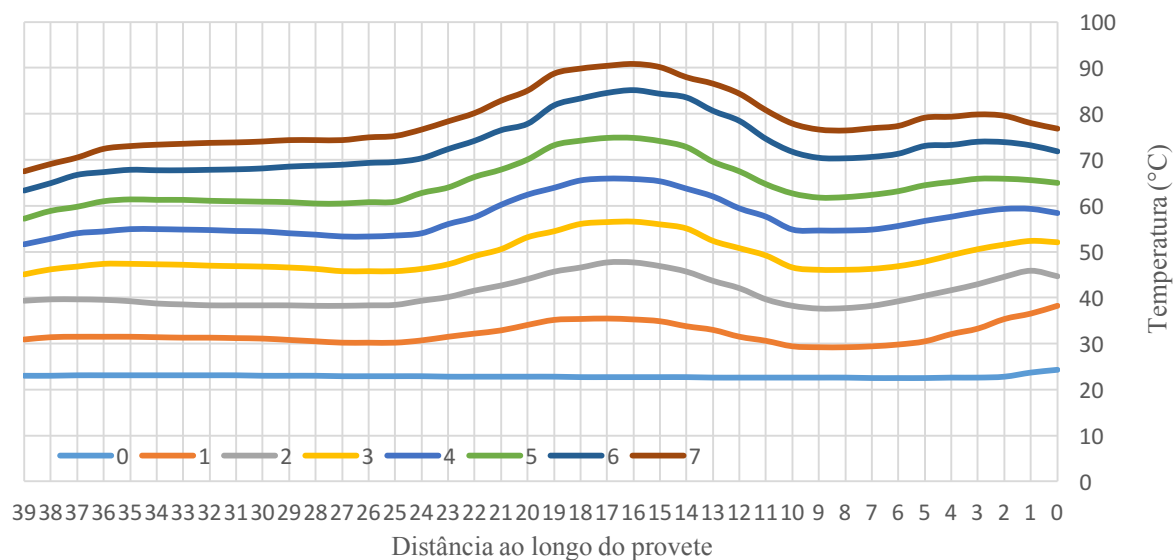


Figura A.33 - Evolução da temperatura do perfil 4 do provete de mistura betuminosa com agregado inferior a 20 mm através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

Provete de Calcário

- 180 Watts

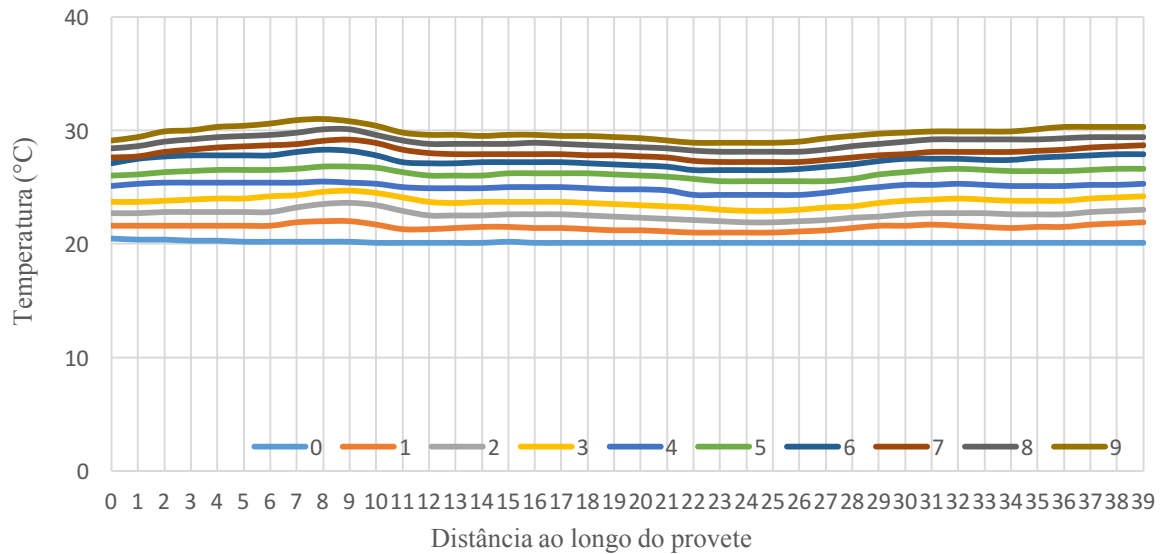


Figura A.34 - Evolução da temperatura do perfil 1 do provete de calcário através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

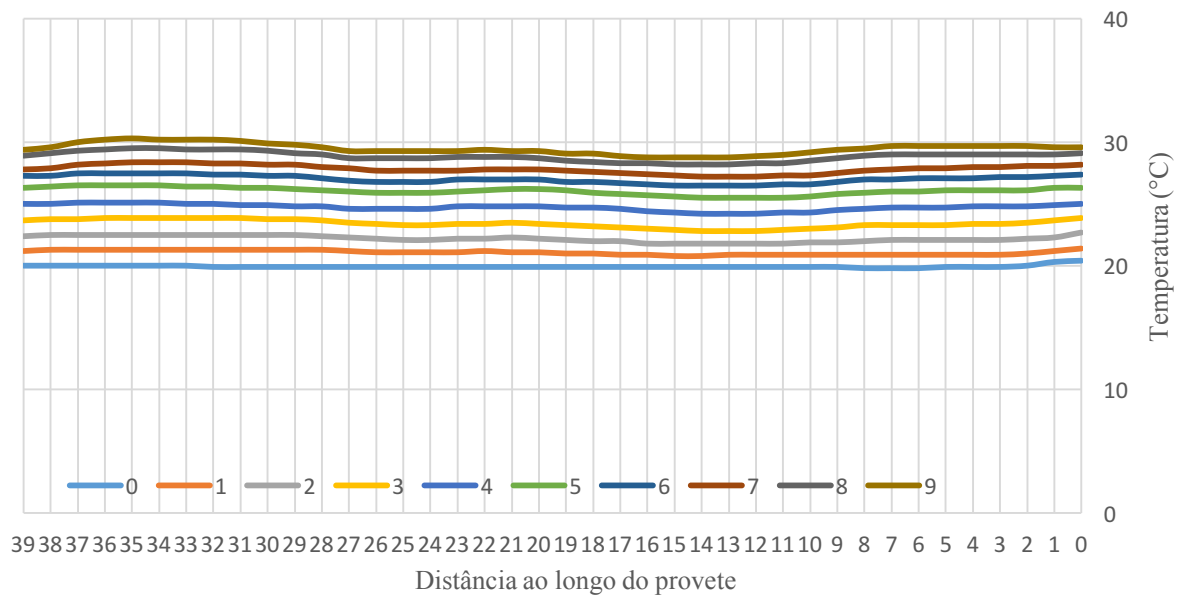


Figura A.35 - Evolução da temperatura do perfil 2 do provete de calcário através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

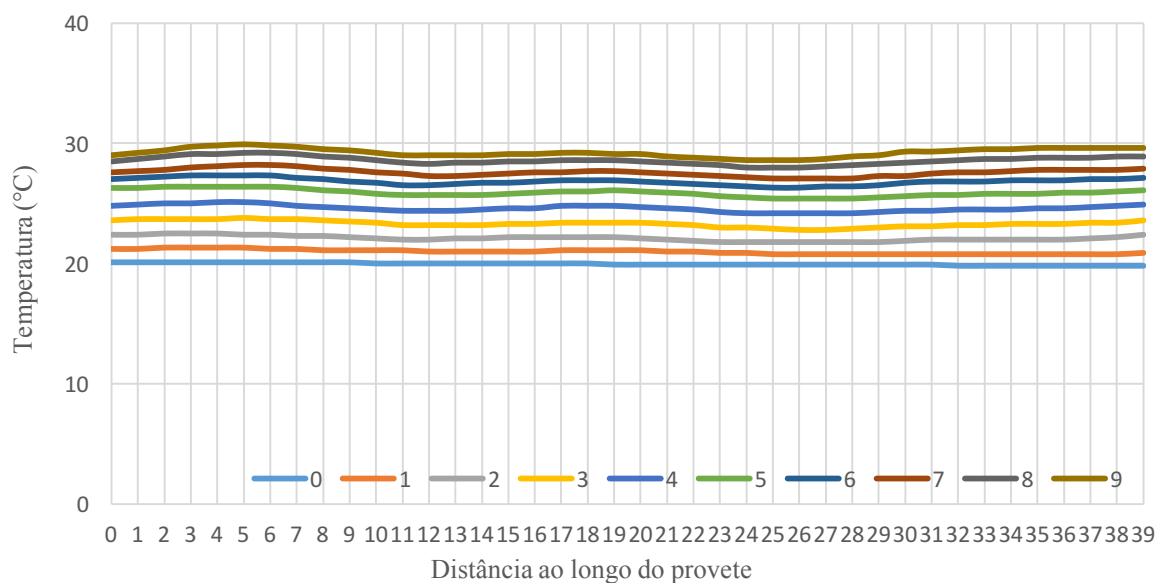


Figura A.36 - Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de calcário através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

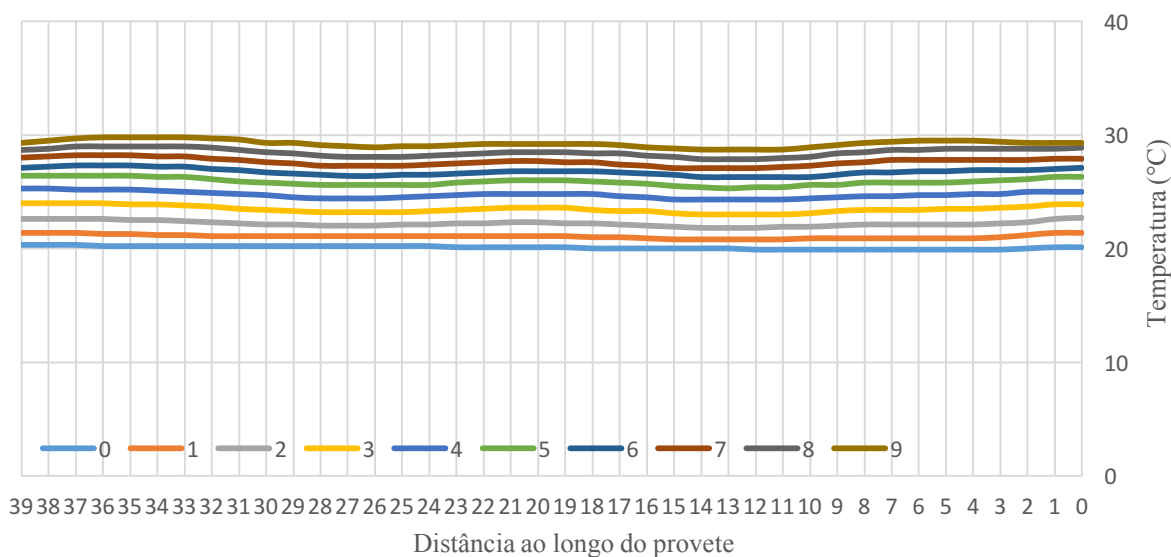


Figura A.37 - Evolução da temperatura do perfil 4 do provete de calcário através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

- 540 Watts

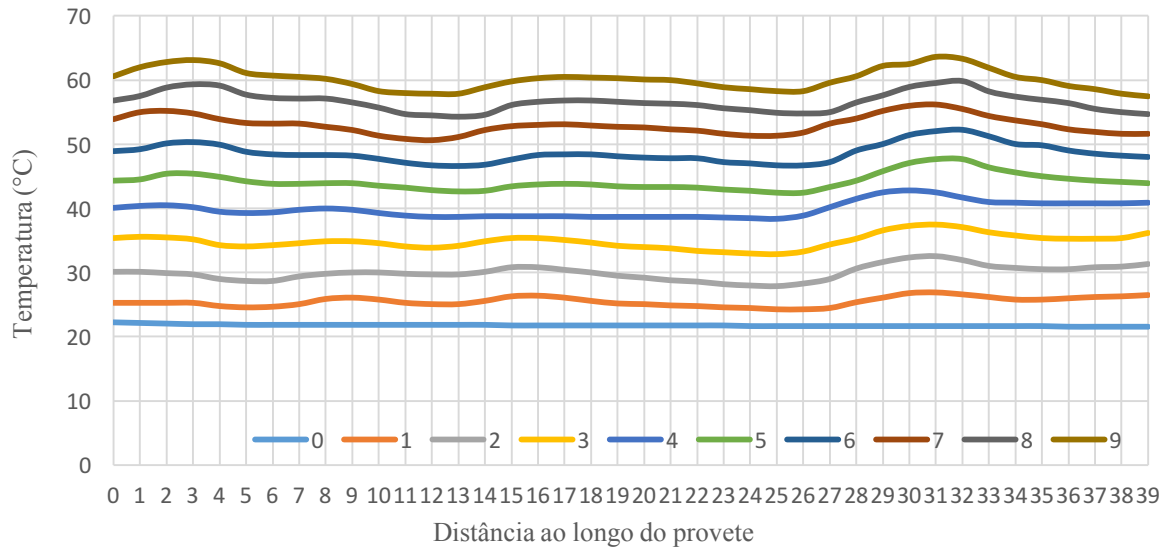


Figura A.38 - Evolução da temperatura do perfil 1 do provete de calcário através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

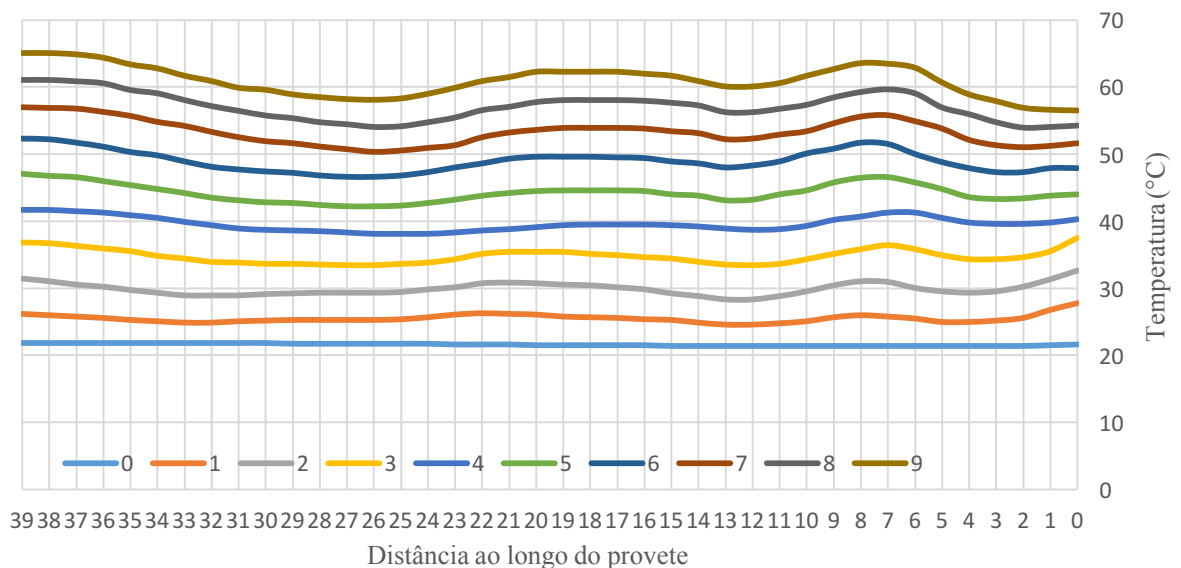


Figura A.39 - Evolução da temperatura do perfil 2 do provete de calcário através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

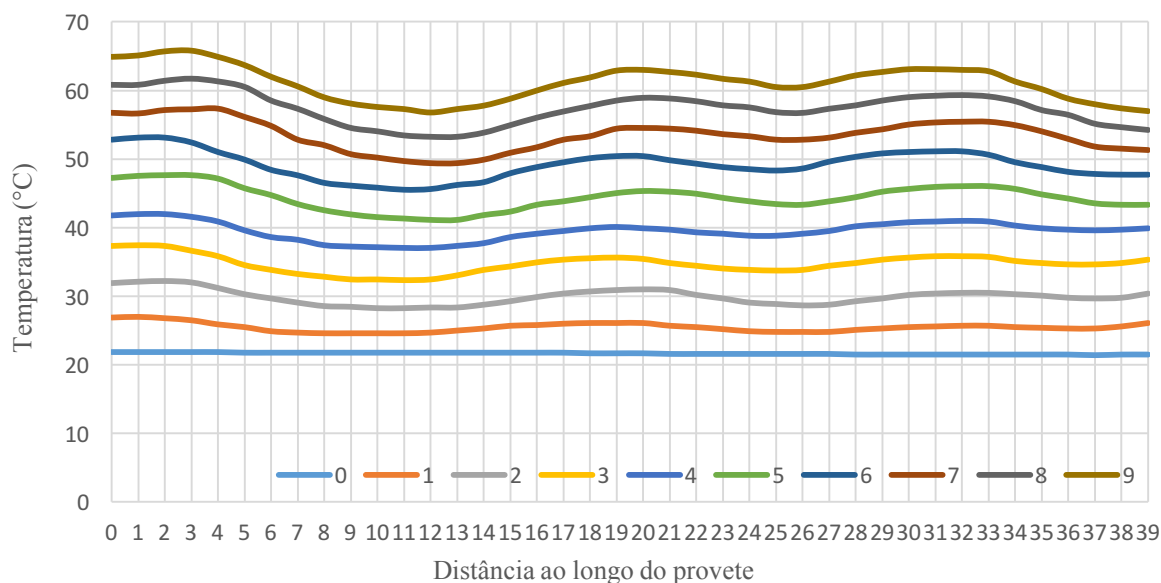


Figura A.40 - Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de calcário através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

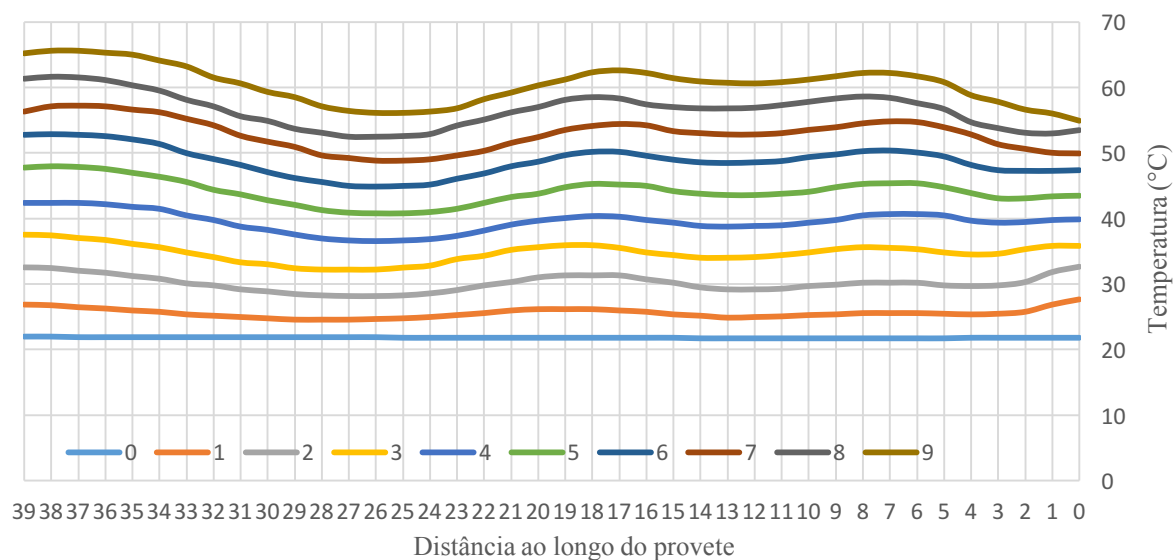


Figura A.41 - Evolução da temperatura do perfil 4 do provete de calcário através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

- 900 Watts

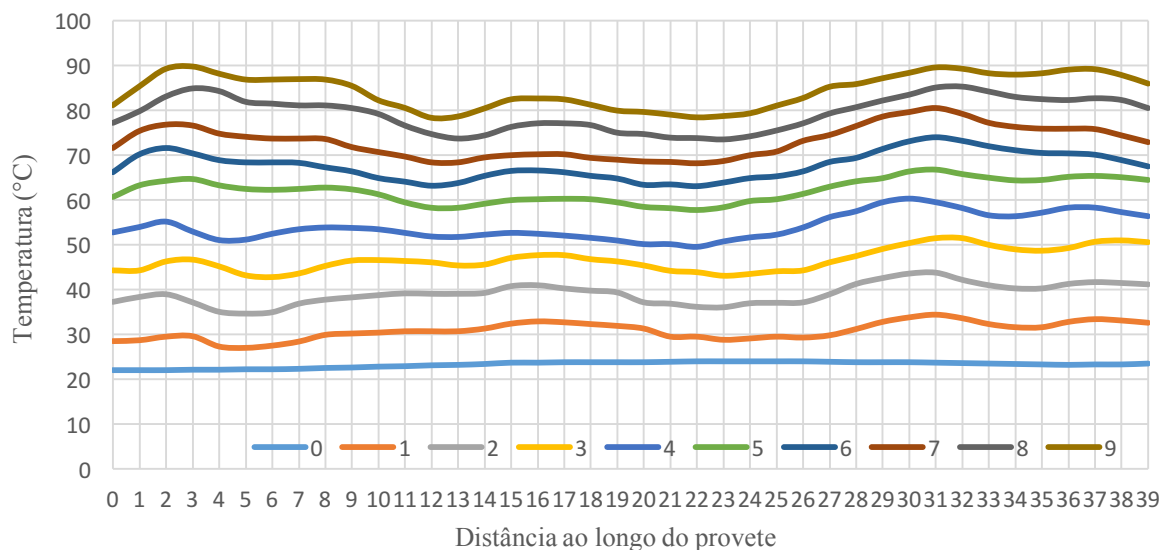


Figura A.42 - Evolução da temperatura do perfil 1 do provete de calcário através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

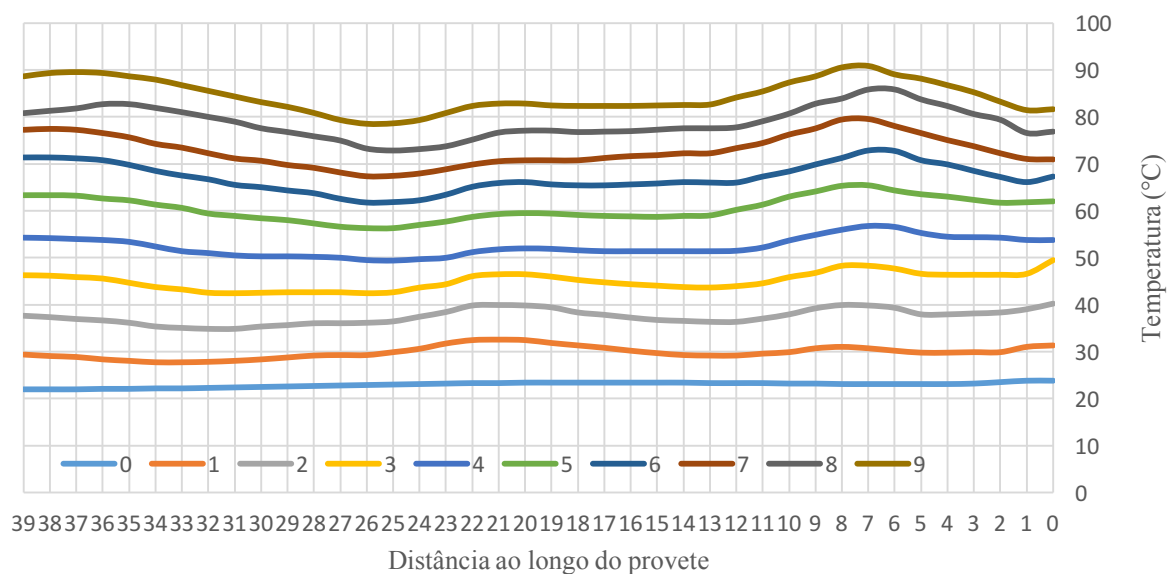


Figura A.43 - Evolução da temperatura do perfil 2 do provete de calcário através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

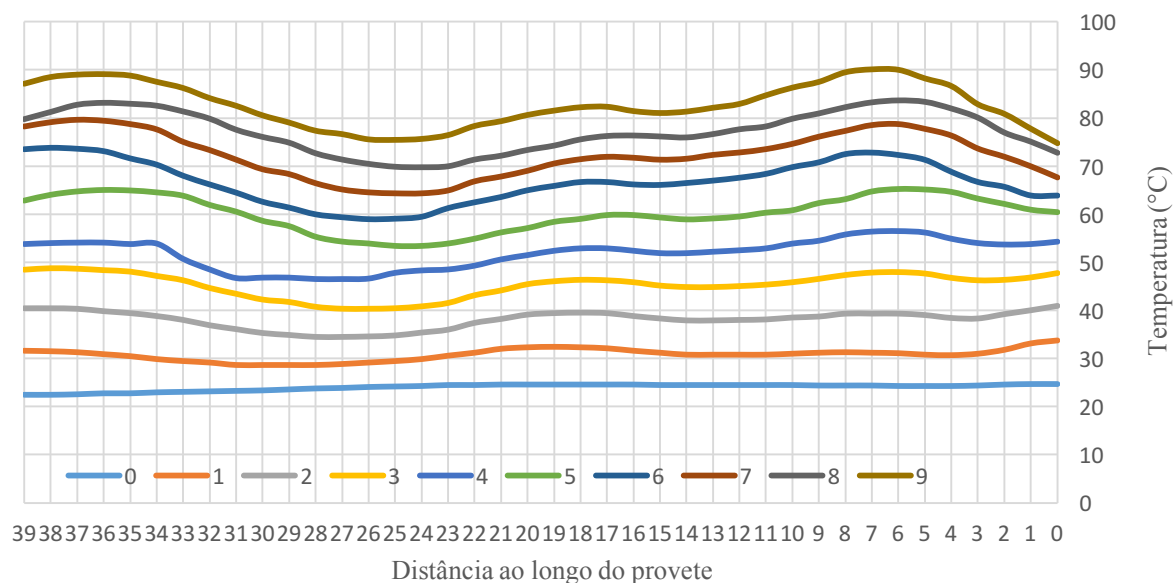


Figura A.44 - Evolução da temperatura do perfil 4 do provete de calcário através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

Provete de Basalto

- 180 Watts

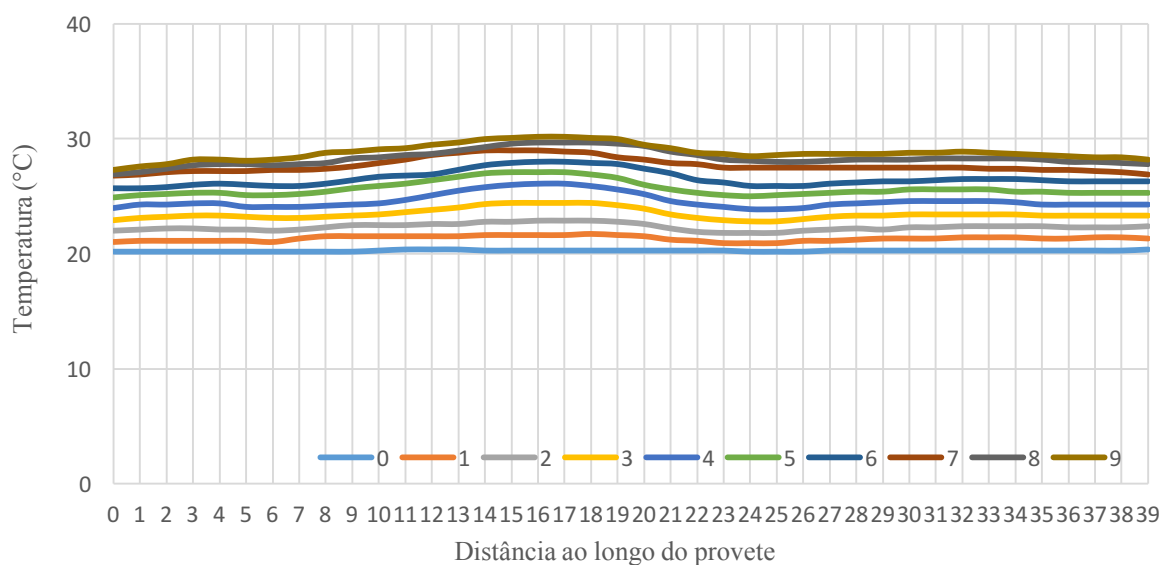


Figura A.45 - Evolução da temperatura do perfil 1 do provete de basalto através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

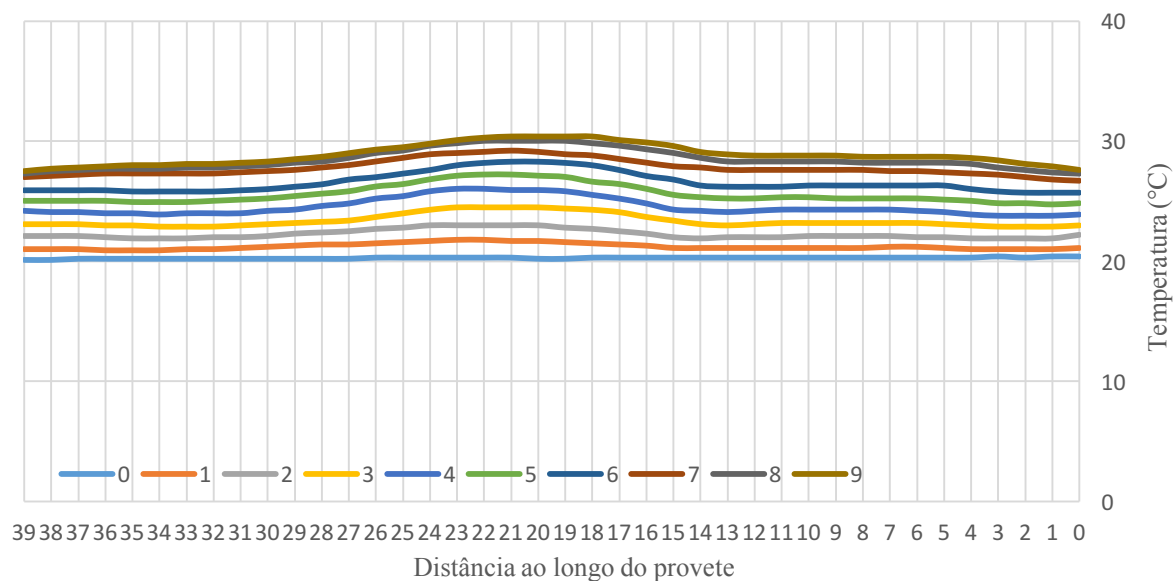


Figura A.46 - Evolução da temperatura do perfil 2 do provete de basalto através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Callex Soft

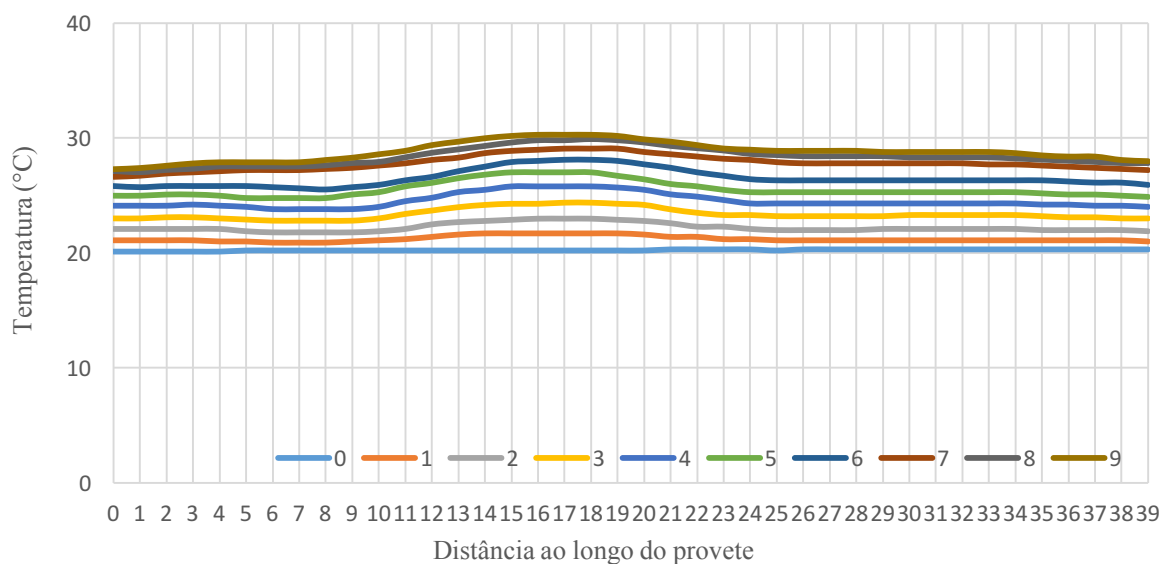


Figura A.47 - Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de basalto através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Callex Soft

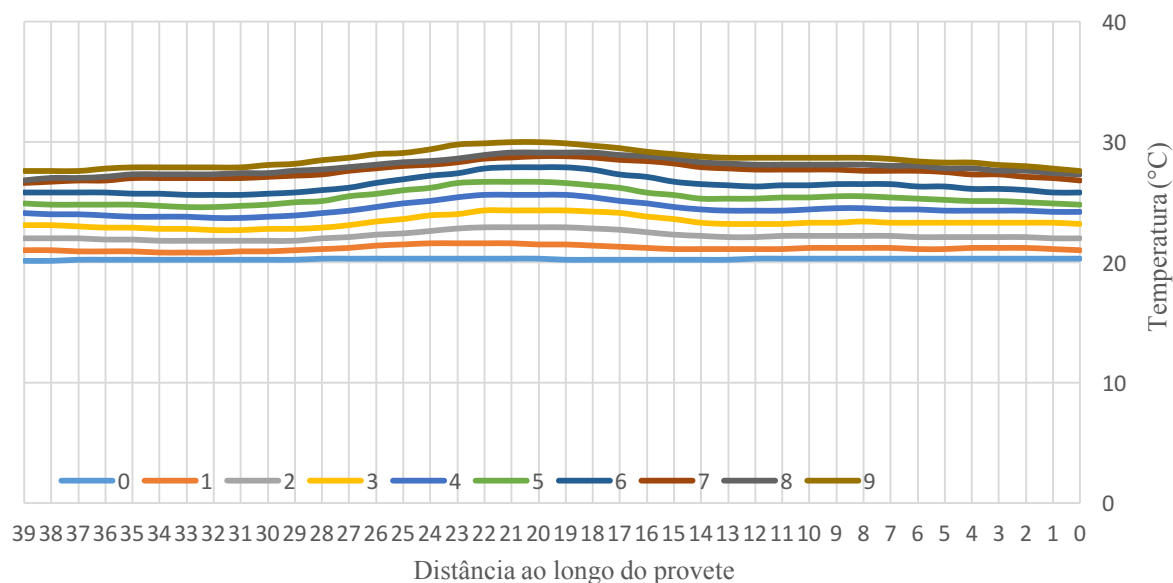


Figura A.48 - Evolução da temperatura do perfil 4 do provete de basalto através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 180 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

- 540 Watts

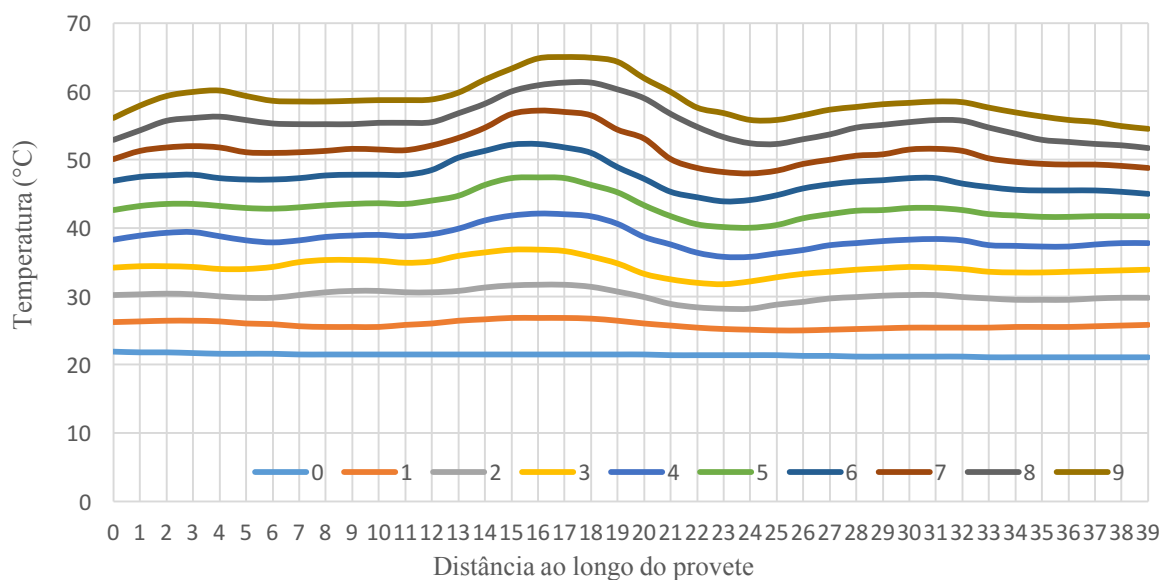


Figura A.49 - Evolução da temperatura do perfil 1 do provete de basalto através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

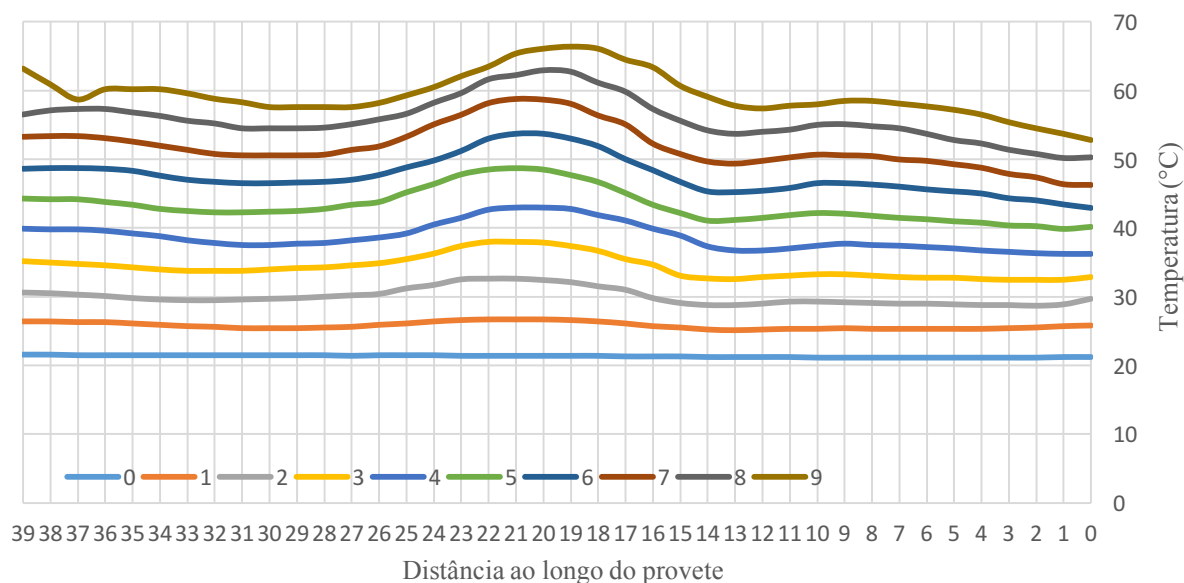


Figura A.50 - Evolução da temperatura do perfil 2 do provete de basalto através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

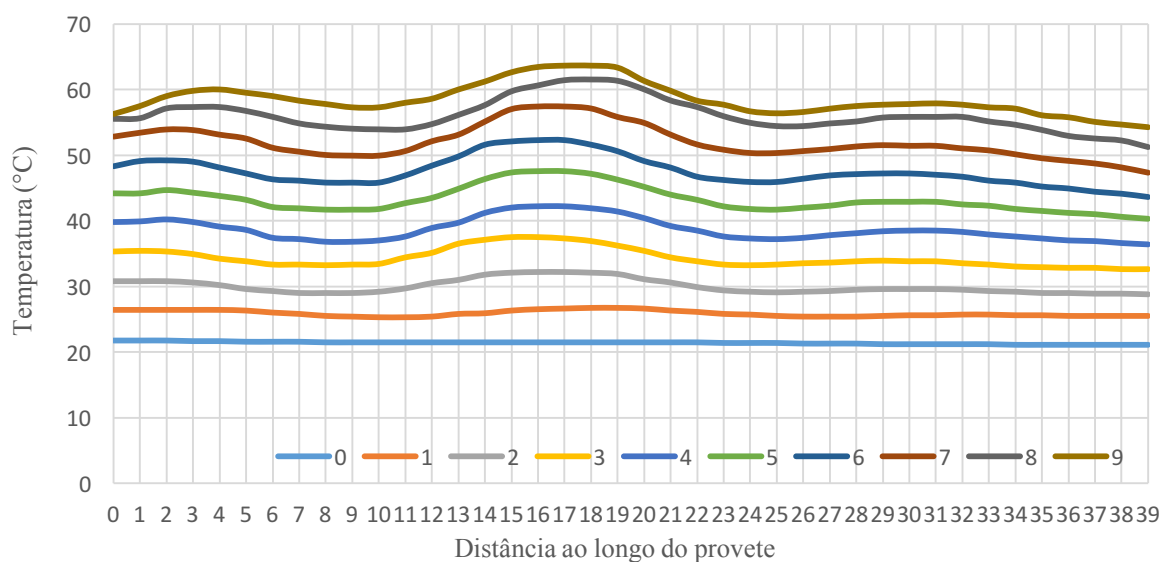


Figura A.51 - Evolução da temperatura do perfil 3 do provete de basalto através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

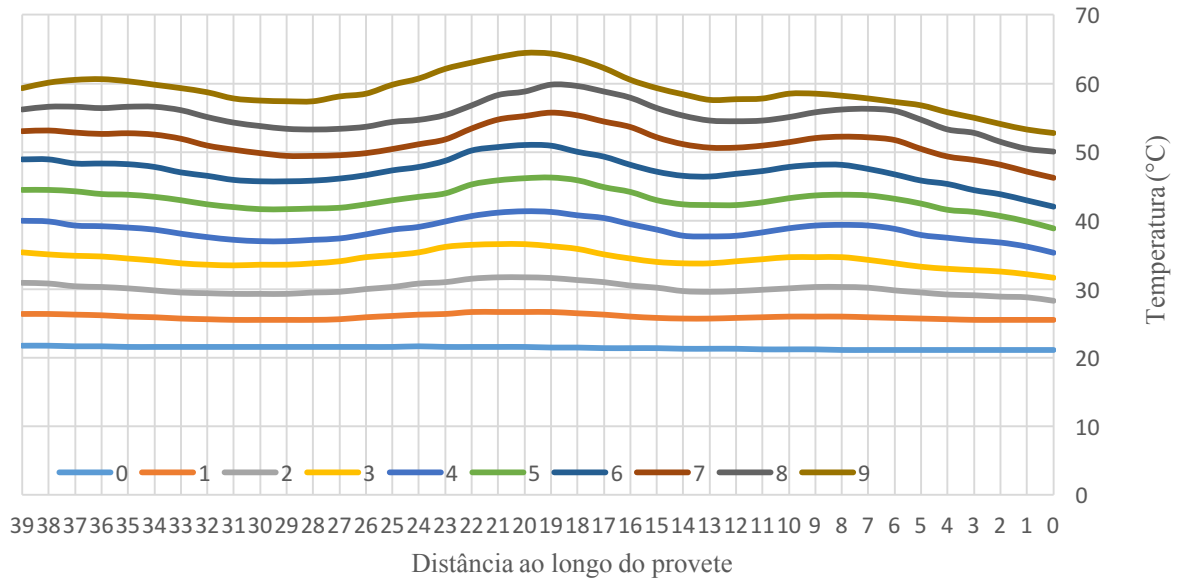


Figura A.52 - Evolução da temperatura do perfil 4 do provete de basalto através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 540 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

- 900 Watts

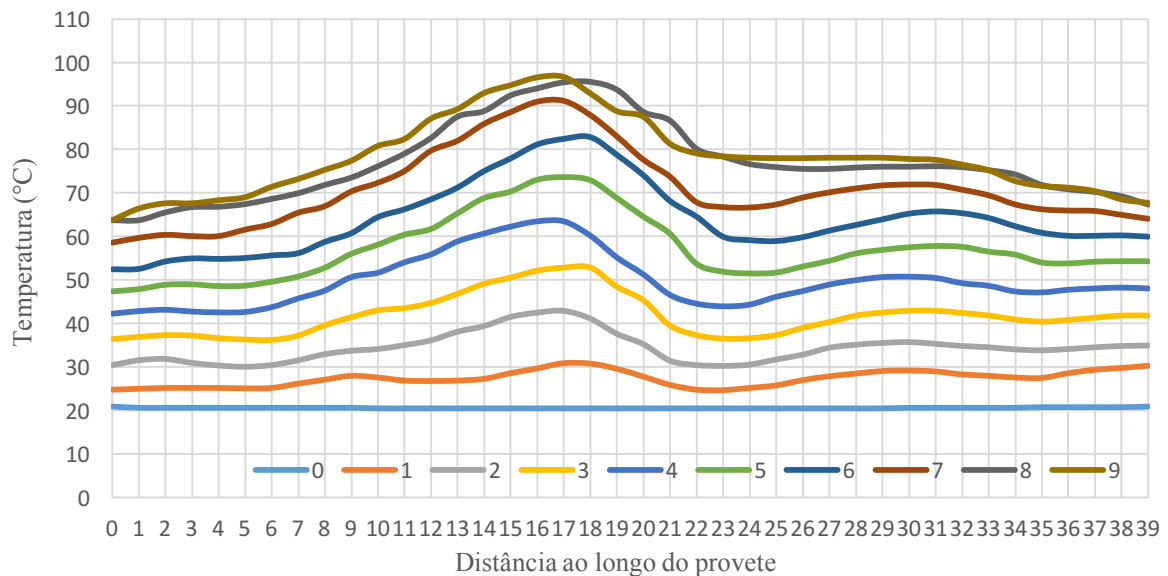


Figura A.53 - Evolução da temperatura do perfil 1 do provete de basalto através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Calex Soft

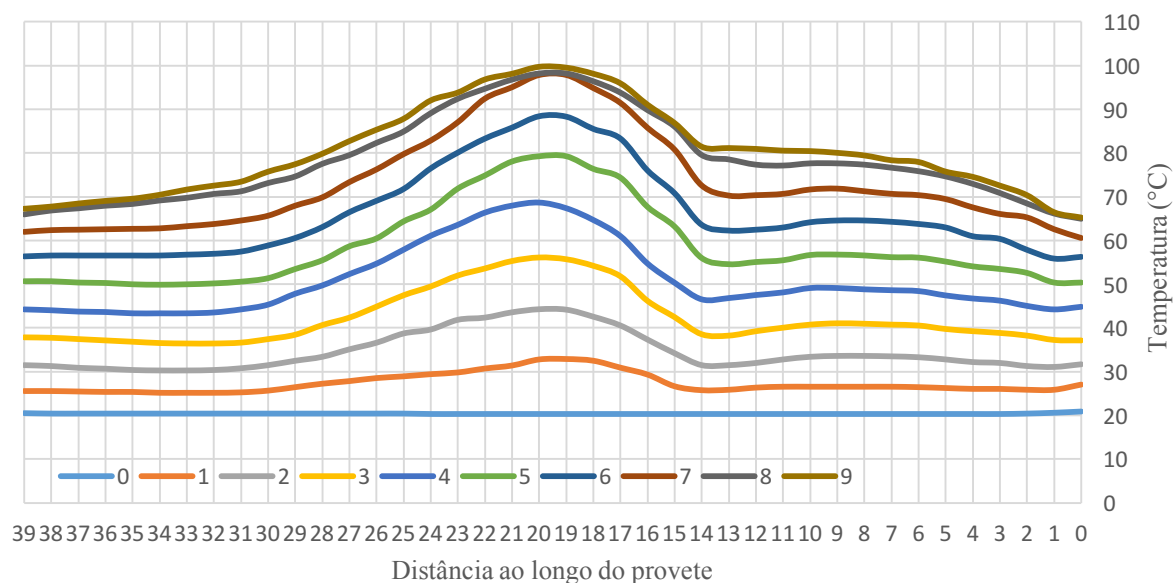


Figura A.54 - Evolução da temperatura do perfil 2 do provete de basalto através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Callex Soft

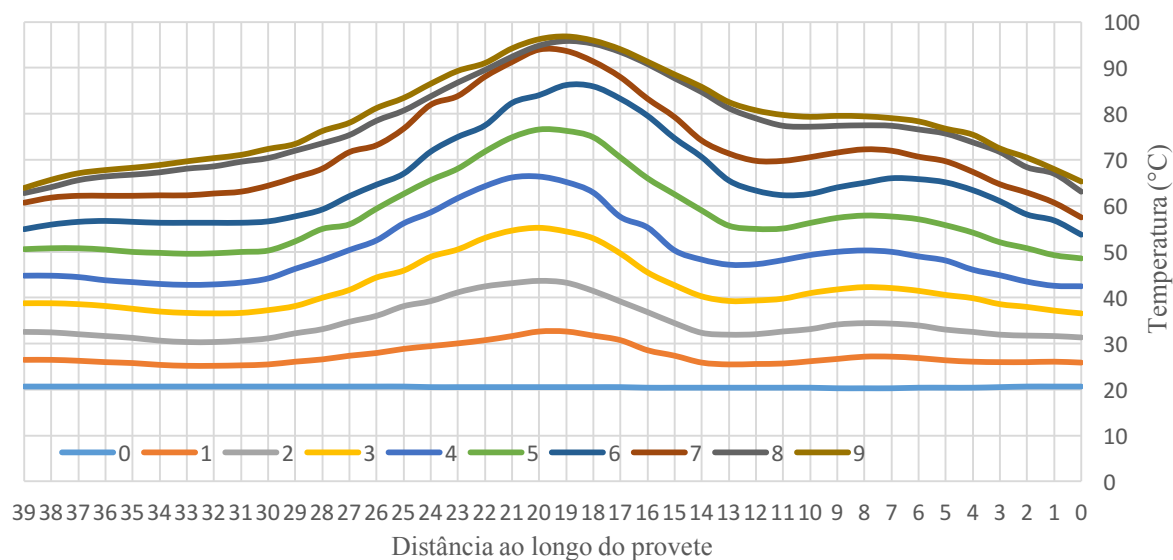


Figura A.55 - Evolução da temperatura do perfil 4 do provete de basalto através de um minuto de aquecimento com micro-ondas a uma potência de 900 Watts com utilização do termómetro Callex Soft