



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2011

**RITA TAVARES
AFONSO**

**MICROAGLOMERADOS BETUMINOSOS E
SLURRIES COLORIDOS**



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2011

**RITA TAVARES
AFONSO**

**MICROAGLOMERADOS BETUMINOSOS E
SLURRIES COLORIDOS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Aos meus Pais.

Sem eles, nada faria sentido.

O júri

Presidente

Prof.^a Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof.^a Doutora Rosa Paula da Conceição Luzia
Professora Adjunta da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Prof. Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Por todo o trabalho executado, expresso a minha sincera gratidão:

Ao Professor Doutor Agostinho Benta, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, o meu orientador de Dissertação, pela disponibilidade concedida, pelo apoio prestado em todos os momentos e aspectos, pela sabedoria transmitida, pela análise crítica de resultados, e pelo constante incentivo e confiança depositada.

À empresa ProbiGalp, Ligantes Betuminosos, S.A., pela oportunidade concedida para a execução do estágio laboratorial, contribuindo definitivamente para um alargar de conhecimentos e horizontes, especialmente no mundo laboral. Agradeço também a todos os membros da empresa, que directa ou indirectamente deram o seu contributo para que o presente estudo pudesse ser realizado nas melhores condições.

À Engenheira Cátia Duarte, pelo acompanhamento prestado ao longo de todo o trabalho, pela informação cedida, pela análise crítica de resultados, pelos ensinamentos concedidos, por todo o incentivo e enorme dedicação e empenho.

Ao Sr. Augusto Almeida, Chefe de Laboratório, pela disponibilidade prestada sempre que necessário, análise de resultados e acompanhamento dos trabalhos.

Ao Ulisses Teixeira, Técnico de Laboratório, por todos os conhecimentos transmitidos, pelo acompanhamento dos trabalhos e constante disponibilidade e ajuda, que foram imprescindíveis para a realização desta Dissertação.

Ao Nuno Pires, Técnico de Laboratório, pelo constante e enorme apoio em todos os trabalhos, pelos ensinamentos prestados, pelos conselhos dados, pela grande dedicação, incentivo, ajuda e amizade, incondicionalmente presentes.

Ao Francisco Rodrigues, Técnico de Laboratório, por todo o auxílio prestado, pelo grande contributo em diversas actividades, pela constante força, incentivo ao trabalho, e companheirismo.

Ao Helder Cardoso, Responsável de Produção, pelo apoio, e conhecimento transmitido, consequência da sua experiência.

À Inês Marques, Técnica de Laboratório, pela grande disponibilidade e ajuda, oferecidas, e pela simpatia demonstrada.

À Ana Lucas, Técnica de Laboratório, também pela disponibilidade dedicada, sempre que solicitada.

Ao Sr. Bastos, pelas orientações e ensinamentos, que reflectem largos anos de experiência e conhecimento na área de revestimentos superficiais, e que foram indispensáveis ao bom prosseguimento dos trabalhos.

Um especial agradecimento aos meus Pais, Ermelinda Afonso e Manuel Bandeira, por todo o apoio prestado, pela enorme compreensão, pela paciência demonstrada em todos os momentos, especialmente nos mais complicados, e pela força que foi imprescindível à elaboração desta Dissertação, assim como em todo o meu percurso académico. A eles, um muito obrigada por estarem sempre tão presentes.

Às restantes pessoas da minha família, pela força que me deram, um muito obrigada.

Aos meus amigos pelo companheirismo, amizade, ajuda e compreensão.

Às pessoas e entidades já referidas, e a todos os que contribuíram de forma directa ou indirecta para a realização desta Dissertação, expresso a minha sincera gratidão, pois sem essa contribuição, não seria possível a execução do presente estudo.

Palavras-chave

Emulsão Betuminosa, Microaglomerado Betuminoso, Slurry Colorido.

Resumo

Partindo de uma formulação já existente de Microaglomerados Betuminosos a Frio, estudou-se essa formulação, implementando um tipo de betume diferente: Betume Galp Energia. Desde o fabrico e análise das emulsões betuminosas, até à produção do microaglomerado propriamente dito, todo o processo foi trabalhado; nomeadamente, as emulsões, que constituíram um factor de elevada importância, dado que condicionam em muito o comportamento dos microaglomerados. Por este motivo, foram produzidas fazendo-se variar alguns dos seus componentes, e assim era possível observar o comportamento do respectivo microaglomerado. Ainda assim, os restantes elementos necessários para a mistura, não podem nem foram, de maneira alguma, descurados.

Para além deste revestimento superficial, estudou-se ainda o Slurry Colorido, otimizando formulações com ligantes diferentes dos convencionais, nomeadamente quatro tipos de ligantes sintéticos.

Keywords

Bitumen Emulsion, Bituminous Microsurfacing, Colored Slurry.

Abstract

Based on an existing formulation of Microsurfacing, a formulation was study by implementing a different type of bitumen: Galp Energia Bitumen. From the bitumen emulsions production and analysis, to the production of microsurfacing, the whole processes was improved, particularly emulsions, which were a factor of great importance, because they greatly affect microsurfacing's performance. Therefore, during their manufacture, some of their components were changed, and thus it was possible to observe the performance of their microsurfacing. Still, the remaining elements necessary for the mixture, were not forgotten.

Besides this surface dressing, it was study Colored Slurry, optimizing formulations with binders distinct of the conventional, particularly, four types of synthetic binders.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABELAS	ix
1.Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objectivos.....	2
2.Tratamentos Superficiais	3
2.1. Tipos de tratamentos superficiais	3
2.1.1. Revestimentos superficiais betuminosos.....	3
2.1.2. Slurry Superficial.....	7
2.1.3. Slurry Colorido.....	8
2.1.4. Argamassa betuminosa.....	9
2.1.5. Pavimentos anti-derrapantes.....	9
2.2. Tipos de equipamentos para aplicação de tratamentos superficiais	10
2.3. Factores que condicionam o dimensionamento e o desempenho dos tratamento superficiais	11
2.3.1. Mecanismos de rotura.....	12
3.Emulsões Betuminosas – Noções Base	13
3.1. Classificação das emulsões betuminosas e suas propriedades	13
3.1.1. Classificação quanto ao tipo de fases	14
3.1.2. Classificação quanto à natureza iónica.....	15
3.1.3. Classificação quanto ao pH	16
3.1.4. Classificação quanto à velocidade de rotura.....	17
3.1.5. Classificação quanto à percentagem de betume presente na emulsão.....	18
3.1.6. Classificação quanto ao tamanho das partículas de betume	19
3.1.7. Classificação quanto à natureza.....	20
3.2. Outras propriedades	20
3.2.1. Viscosidade.....	20
3.2.2. Estabilidade durante o armazenamento e o transporte	21
3.2.3. Adesividade ou Adesão	27

3.2.4. Coesão	28
4. Emulsões Betuminosas – Trabalho Experimental.....	29
4.1. Constituintes e Formulação	29
4.2. Ensaio de caracterização das emulsões.....	33
4.2.1. Evaporação simples.....	34
4.2.2. Determinação do valor de pH.....	35
4.2.3. Determinação do resíduo de peneiração.....	35
4.2.4. Determinação do índice de rotura	36
4.2.5. Determinação das percentagens de betume residual e fluidificante através de destilação.....	37
4.2.6. Determinação do tempo de escoamento através de um viscosímetro de fluxo.....	38
4.2.7. Determinação da tendência para a sedimentação	39
4.2.8. Recuperação do resíduo por evaporação	41
4.3. Resultados da investigação laboratorial	42
4.4. Principais conclusões da formulação das emulsões	64
5. Microaglomerado Betuminoso a Frio	65
5.1. Propriedades dos Microaglomerados	68
5.2. Constituintes e sua caracterização	72
5.2.1. Agregados.....	73
5.2.2. Filer	79
5.2.3. Emulsão betuminosa	79
5.2.4. Aditivo.....	80
5.2.5. Água	81
5.3. Formulação e aplicação	81
5.4. Ensaio a realizar para a caracterização dos microaglomerados	86
5.4.1. Consistência	87
5.4.2. Taxa de aplicação	88
5.4.3. Determinação da coesão da mistura	89
5.4.4. Determinação do desgaste	90
5.5. Resultados obtidos e conclusões	91

5.5.1. Resumo das principais conclusões da produção de microaglomerados betuminosos a frio	95
6. Slurry Colorido	97
6.1. Constituintes e sua descrição	97
6.2. Formulação	99
6.3. Descrição dos ensaios	100
6.3.1. Consistência	100
6.3.2. Teor em água	101
6.4. Resultados e conclusões	101
6.4.1. Resumo das principais conclusões da formulação de Slurry Colorido	104
7. Considerações Finais e Trabalhos Futuros	105
8. Bibliografia	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Revestimento superficial simples (Adaptado de: Vicente, 2006).....	4
Figura 2.	Revestimento superficial simples com duplo espalhamento de gravilha (Adaptado de: Vicente, 2006).....	5
Figura 3.	Revestimento superficial duplo (Adaptado de: Vicente, 2006).....	5
Figura 4.	Revestimento superficial duplo invertido (Adaptado de: Vicente, 2006)	6
Figura 5.	Revestimento superficial tipo sandwich (Adaptado de: Vicente, 2006)	6
Figura 6.	Demonstração da envolvência das partículas de betume pelo emulsionante numa emulsão catiónica (Bernucci et al., 2008).....	15
Figura 7.	Comportamento do emulsionante na emulsão (Bernucci et al., 2008).....	16
Figura 8.	Fenómenos de Sedimentação, Floculação e Coalescência, respectivamente (RF, 2008).....	24
Figura 9.	Sistemas de agitação ou recirculação: a) Agitador de hélice; b) Agitador de pás; c) Bomba de palhetas (Engineers, 2006; Químicos, 2007).....	25
Figura 10.	Reservatório indicado para o armazenamento de emulsões, e reservatório a evitar, respectivamente (RF, 2008).....	26
Figura 11.	Veículo compartimentado para transporte de emulsões (Pereira et al., 1999).....	27
Figura 12.	Ilustração dos dois tipos de adesividade em boas e em más condições (RF, 2008).....	28
Figura 13.	Esquema simplificado do fabrico de emulsões (Adaptado de: RF, 2008).....	29
Figura 14.	Instalação piloto para fabrico de emulsões.....	31
Figura 15.	Processo do fabrico de emulsões betuminosas.....	33
Figura 16.	Peneiro de 0.500 mm e o respectivo fundo	36
Figura 17.	Ensaio ao índice de rotura	37
Figura 18.	Processo de destilação, com destaque para a proveta contendo a água e o emulsionante evaporados.....	38
Figura 19.	Viscosímetro de fluxo.....	39
Figura 20.	Armazenamento da emulsão numa proveta de sedimentação	40
Figura 21.	Penetrómetro semi-automático	41

Figura 22.	Equipamento para a determinação da temperatura de amolecimento	42
Figura 23.	Microscópio.....	48
Figura 24.	Emulsões betuminosas: a) E8 – produzida com betume base da refinaria de Matosinhos, com y % de Aditivo J, e com promotor de adesão; b) E12 – produzida com betume base da refinaria de Sines, com y % de Aditivo J, e sem promotor de adesão.....	49
Figura 25.	Imagem das emulsões vista ao microscópio, ambas com ampliação de 40x: a) E8 – produzida com betume base da refinaria de Matosinhos, com y % de Aditivo J, e com promotor de adesão; b) E12 – produzida com betume base da refinaria de Sines, com y % de Aditivo J, e sem promotor de adesão	49
Figura 26.	Valores de betume residual VS viscosidade, para emulsões sem promotor de adesão.....	52
Figura 27.	Valores de betume residual VS viscosidade, para emulsões com promotor de adesão.....	53
Figura 28.	Valores de viscosidade VS tamanho médio das partículas de betume, para emulsões sem promotor de adesão	54
Figura 29.	Valores de viscosidade VS tamanho médio das partículas de betume, para emulsões com promotor de adesão.....	55
Figura 30.	Valores de viscosidade VS sedimentação, para emulsões sem promotor de adesão.....	56
Figura 31.	Valores de viscosidade VS sedimentação, para emulsões com promotor de adesão.....	57
Figura 32.	Valores de viscosidade VS percentagem de emulsionante, para emulsões sem promotor de adesão	58
Figura 33.	Valores de viscosidade VS percentagem de emulsionante, para emulsões com promotor de adesão	59
Figura 34.	Valores de índice de rotura VS percentagem de emulsionante, para emulsões sem promotor de adesão	60
Figura 35.	Valores de índice de rotura VS percentagem de emulsionante, para emulsões com promotor de adesão.....	61
Figura 36.	Valores de tamanho médio das partículas de betume VS índice de rotura, para emulsões sem promotor de adesão	62

Figura 37.	Valores de tamanho médio das partículas de betume VS índice de rotura, para emulsões com promotor de adesão	63
Figura 38.	Micro-textura e macro-textura.....	67
Figura 39.	Aplicação de Slurry Seal (ISSA, 2011-c).....	68
Figura 40.	Rodeiras (Mr.Pothole, 2009-a).....	69
Figura 41.	“Shoving” ou “corrugation” (Shahin, 2005)	70
Figura 42.	Microaglomerado (Insumos Viales S.A., 2011-a).....	71
Figura 43.	Microaglomerado (OSUSA, 2008).....	71
Figura 44.	Peneiração automática e agregados utilizados (classe 0/4).....	74
Figura 45.	Curvas granulométricas de todos os agregados, e fuso granulométrico a respeitar, segundo C.E.E.P.	75
Figura 46.	Curva granulométrica do agregado 0/4, e fuso granulométrico a respeitar.....	76
Figura 47.	Molde troncocónico e pilão	77
Figura 48.	Deformação da amostra quando se encontra saturada com a superfície seca.....	77
Figura 49.	Picnómetros com as amostras.....	78
Figura 50.	Aditivo K.....	81
Figura 51.	Modo de mistura dos componentes do Microaglomerado (Adaptado de: Insumos Viales S.A. 2011-c).....	82
Figura 52.	Central móvel de produção contínua, para microaglomerados betuminosos a frio (Adaptado de: Insumos Viales S.A., 2011-c)	83
Figura 53.	a) Compartimento de colocação dos agregados; b) Misturador (Insumos Viales S.A., 2011-c)	84
Figura 54.	Caso prático de aplicação de Microaglomerados (ISSA, 2011-d).....	85
Figura 55.	Cone utilizado para a avaliação da consistência da mistura.....	87
Figura 56.	Determinação do teor em água óptimo, através do ensaio à consistência (RF, 2008).....	88
Figura 57.	Equipamento para ensaio à coesão de microaglomerados (Bernucci et al., 2008).....	90
Figura 58.	Equipamento para WTAT (Bernucci et al., 2008).....	91

Figura 59. Microaglomerados concebidos com a emulsão E8 (betume base da refinaria de Matosinhos, com y % de Aditivo J, e com promotor de adesão), utilizando 5 fórmulas de trabalho (“a”, “b”, “c”, “d”, “e”)	92
Figura 60. Microaglomerados concebidos com a emulsão E12 (betume base da refinaria de Sines, com y % de Aditivo J, e sem promotor de adesão), utilizando 5 fórmulas de trabalho (“a”, “b”, “c”, “d”, “e”)	92
Figura 61. Microaglomerado efectuado com a emulsão E8, e fórmula de trabalho “b”, logo após aplicação (foto à esquerda), e um dia após aplicação (foto à direita)	94
Figura 62. Microaglomerado efectuado com a emulsão E8, e a fórmula de trabalho “e”, logo após aplicação (foto à esquerda), e um dia após aplicação (foto à direita).....	94
Figura 63. Ensaio de Consistência.....	101
Figura 64. Resultado do ensaio à consistência	102
Figura 65. Comparação do teor em água entre ligantes e pigmentos	103
Figura 66. Aplicação dos slurries coloridos com os ligantes A, B, C e D da esquerda para a direita e de cima para baixo	104

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.	Aplicabilidade das emulsões, consoante o seu tipo de rotura.....	18
Tabela 2.	Valores de referência para emulsões betuminosas catiónicas para aplicação em microaglomerado betuminoso a frio (ProbiGalp, 2010-c).....	43
Tabela 3.	Valores obtidos nos ensaios realizados às emulsões betuminosas produzidas com betume base da refinaria de Matosinhos.....	44
Tabela 4.	Valores obtidos nos ensaios realizados às emulsões betuminosas produzidas com betume base da refinaria de Sines.....	45
Tabela 5.	Resultados da granulometria de todos os agregados e valores do fuso granulométrico.....	74
Tabela 6.	Valores das diversas massas volúmicas determinadas, assim como da absorção de água para o agregado de fracção granulométrica 0/4.....	79
Tabela 7.	Dosagem aconselhada para cada material que compõe um microaglomerado betuminoso a frio.....	86
Tabela 8.	Taxa de aplicação para microaglomerados betuminosos a frio, consoante a fracção granulométrica utilizada.....	89
Tabela 9.	Características dos 4 ligantes sintéticos utilizados.....	98
Tabela 10.	Dosagens utilizadas para a produção de Slurry Colorido.....	100
Tabela 11.	Intervalos da percentagem de água e teor em água, para cada ligante e correspondente pigmento.....	102

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Os revestimentos superficiais têm extrema importância na pavimentação rodoviária, aeroportuária e na requalificação urbana. São os revestimentos que atribuem segurança e conforto aos utilizadores, criando superfícies de elevada qualidade para a circulação de veículos de transporte ou para a circulação pedonal. Assim, têm nos pavimentos que constituem, um papel marcadamente funcional. É com base neste aspecto que foi desenvolvida a presente Dissertação.

É proposto estudar dois tipos de revestimentos superficiais: Microaglomerado Betuminoso a Frio, e Slurry Colorido. Enquanto o primeiro utiliza emulsões de origem betuminosa na sua constituição, no segundo empregam-se ligantes sintéticos.

O aparecimento das emulsões betuminosas é consequência da necessidade de utilizar ligantes que apresentassem, à temperatura ambiente, uma fluidez condicionada (Pereira et al., 1999). Foi então que na segunda metade do século XIX, e início do século XX conseguiu-se realizar diversas aplicações com “emulsões” fluidas. No entanto, só no ano de 1922, surgiram as emulsões betuminosas, pela mão de um químico inglês, de seu nome Alan Mackay. Este foi um passo de extrema importância e que veio a revolucionar o mundo dos revestimentos superficiais. Logo após esta descoberta (tratavam-se de emulsões betuminosas aniónicas), as emulsões começaram a ser muito utilizadas e o seu crescimento aumentava de ano para ano, assim como a sua expansão por uma grande quantidade de países (França, Inglaterra, Alemanha, Dinamarca, Austrália e Índia). Demorou 29 anos até ao surgimento, em 1951, das primeiras emulsões betuminosas catiónicas, que vieram a substituir quase por completo as emulsões aniónicas, devido às características melhoradas de que gozavam. Ao longo do tempo, ambas foram sofrendo alterações, que melhoraram as suas propriedades e desempenho, consoante a aplicação que lhes era atribuída, ainda que hoje em dia as emulsões catiónicas prevaleçam claramente sobre as emulsões aniónicas (RF, 2008).

Em 1978 uma outra descoberta voltou a marcar os revestimentos superficiais: o Microaglomerado Betuminoso a Frio. Este foi também o culminar de uma série de técnicas que foram surgindo e sendo aperfeiçoadas. Trata-se de uma mistura produzida

precisamente com emulsões catiónicas, dando origem a um revestimento superficial de espessura reduzida e com boas características superficiais.

O Slurry Colorido surgiu com o objectivo de embelezamento, e diferenciação entre faixas, para a melhor segurança dos utilizadores. Os *slurries* coloridos são misturas a frio coloridas ou pigmentadas. Podem usufruir de qualquer cor, podendo ser também translúcidos.

Todas estas técnicas fazem parte de processos sem término, uma vez que a ciência se encontra em constante desenvolvimento, surgindo cada vez mais novas técnicas, e aperfeiçoamento das já existentes. É neste sentido que se apresenta esta Dissertação. Ao longo de todo o trabalho, todos estes métodos são descritos e devidamente desenvolvidos.

1.2.Objectivos

A presente Dissertação aborda dois géneros distintos de Slurry Superficial: Microaglomerados Betuminosos a Frio e *Slurries* Coloridos. Trata-se de revestimentos superficiais utilizados em pavimentos.

No entanto, nenhum dos dois são técnicas consideradas inovadoras, visto apresentarem já uma longa existência.

No que diz respeito aos Microaglomerados, o objectivo é efectuar a sua formulação utilizando betumes com origem Galp Energia (provenientes das refinarias de Sines e de Matosinhos), dado que até ao momento, não se conseguiu alcançar este objectivo com resultados satisfatórios.

Com o Slurry Colorido pretende-se otimizar a formulação já existente, com o teste de ligantes alternativos aos convencionais.

Este trabalho resulta de uma parceria entre o Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e a empresa ProbiGalp, Ligantes Betuminoso, S.A..

2. TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

Os tratamentos superficiais são aplicados ao nível da camada de desgaste e são detentores de uma relevante importância para a circulação, nomeadamente em relação à comodidade e segurança da condução (Vicente, 2006). Estes podem ser aplicados aquando da construção do pavimento, ou como técnicas de conservação ou de reabilitação. No entanto, não interferem directamente na condição estrutural do pavimento, sendo que este não deve apresentar problemas estruturais quando o tratamento for executado.

Existem diversos tipos de tratamentos, que serão enumerados de seguida. Estes podem ou não ser coloridos, sendo que dentro dos coloridos, existem diversas técnicas de pigmentação.

2.1. Tipos de tratamentos superficiais

Existe uma gama muito variada de tratamentos superficiais. Estes são escolhidos com base nas suas características, desempenho e objectivo pretendido com o revestimento. De seguida apresentam-se alguns tipos de tratamentos superficiais geralmente utilizados:

2.1.1. Revestimentos superficiais betuminosos

Os revestimentos superficiais foram “*a primeira tentativa protagonizada pelo homem, para correcção da superfície dos pavimentos*” (Roma, 1999). Estes surgiram no final do século XIX, e tinham como objectivos principais a impermeabilização e protecção dos pavimentos.

Segundo o autor Hunter (2000), existem 6 tipos de revestimentos superficiais. Estes divergem principalmente na quantidade de camadas de ligante e de agregado, e têm como funções, segundo Benta (2009):

- Facultar um revestimento anti-derrapante;
- Impermeabilizar o pavimento;
- Garantir um revestimento de alta flexibilidade para que possa suportar grandes deformações;

- Proporcionar uma camada de rolamento com elevada resistência ao desgaste e de baixa espessura;
- Proteger a infra-estrutura do pavimento.

No entanto, a rugosidade elevada possuída por estes revestimentos, provocam um maior desgaste dos pneus, um avultado ruído de circulação, e um gasto considerável de combustível.

2.1.1.1. Revestimento superficial simples

Este tipo de revestimento é o mais económico e o mais utilizado de todos os descritos. Consta na aplicação de apenas uma camada de ligante, seguida pela aplicação dos agregados, que detêm uma granulometria uniforme, como se pode constatar na Figura 1. É aconselhável que seja aplicado em pavimentos que apresentem um TMDA máximo de 300 veículos, dado que este tipo de revestimento não ostenta uma considerável resistência a esforços tangenciais muito elevados (Vicente, 2006).

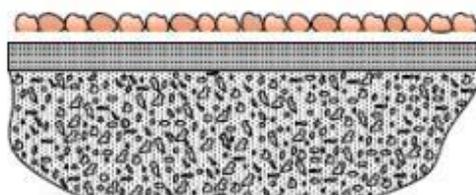


Figura 1. Revestimento superficial simples (Adaptado de: Vicente, 2006)

2.1.1.2. Revestimento superficial simples com duplo espalhamento de gravilha

Tal como o revestimento superficial simples, este método também utiliza apenas uma camada de ligante, diferindo no número de camadas de agregados. Após a colocação do ligante, aplica-se uma camada de agregados com tamanho entre 10 mm e 14 mm, deixando algum espaço livre entre eles. Este espaço será preenchido de seguida, com agregados entre os 3 mm e os 6 mm (Figura 2). Uma vez que os pneus dos veículos que circulam no pavimento terão contacto principalmente com os agregados de tamanho superior, os

agregados menores não irão sofrer um desgaste significativo, sendo que se torna possível, e até recomendável, a utilização de agregados pequenos mais económicos, como por exemplo o calcário. A finalidade deste método é obter uma melhor ligação mecânica entre os agregados. É ainda detentor de diversas vantagens, como reduzir a possibilidade da projecção dos agregados maiores para os veículos, e boa adesão entre os agregados de grandes dimensões (Hunter, 2000).

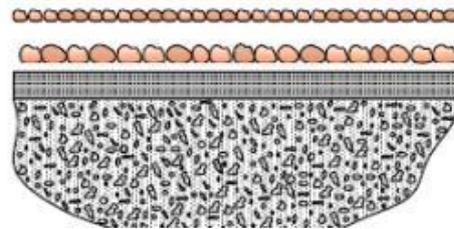


Figura 2. Revestimento superficial simples com duplo espalhamento de gravilha (Adaptado de: Vicente, 2006)

2.1.1.3. Revestimento superficial duplo

A presente solução consiste na aplicação de uma camada de ligante seguida de uma camada de agregados. Este processo é realizado duas vezes no total (Figura 3), sendo que na primeira fase os agregados têm entre 10 mm e 14 mm, e na segunda fase estes são de 6 mm. O objectivo deste método face ao anterior, é obter um revestimento mecanicamente mais forte e com uma textura inferior. São indicados para pavimentos com tráfego elevado e rápido (Hunter, 2000).

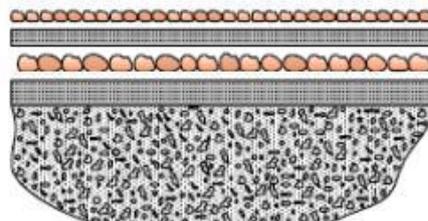


Figura 3. Revestimento superficial duplo (Adaptado de: Vicente, 2006)

2.1.1.4. Revestimento superficial duplo invertido

Como o próprio nome indica, neste tipo de revestimento as camadas de agregado são colocadas com ordem inversa às do revestimento superficial duplo (Figura 4). O método é apropriado para estradas menos importantes, quando a textura da superfície não é um factor relevante, ou quando a degradação da superfície é grande (Hunter, 2000).

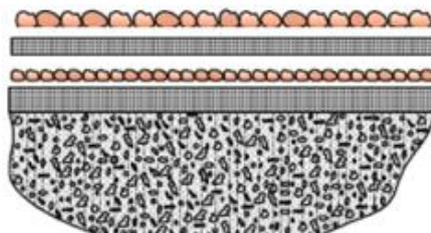


Figura 4. Revestimento superficial duplo invertido (Adaptado de: Vicente, 2006)

2.1.1.5. Revestimento superficial tipo sandwich

É utilizado em superfícies que incorporem já uma quantidade suficiente de ligante, visto que a primeira camada a ser colocada é de agregado (entre os 10 mm e os 14 mm), e esta tem que ficar ligada à superfície já existente. Seguidamente aplica-se uma camada de ligante, e por fim a segunda camada de agregado (6 mm). Sendo assim, este género de revestimento, é passível de ser considerado um revestimento duplo, dado que é detentor de duas camadas de ligante e duas camadas de agregado, alternadamente, como se pode verificar na Figura 5 (Hunter, 2000).

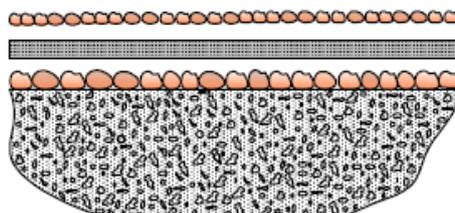


Figura 5. Revestimento superficial tipo sandwich (Adaptado de: Vicente, 2006)

2.1.1.6. Pré-tratamento de selagem de fendas

Trata-se de um revestimento simples com agregados de cerca de 6 mm e betume modificado com elastómeros, em que o objectivo é tornar a superfície existente uniforme, para que posteriormente possa ser revestida. Este método é usualmente aplicado a superfícies que se encontram muito irregulares devido aos danos provocados pelo tráfego. No entanto, é possível substituir esta solução, utilizando o sistema de revestimento superficial simples com duplo espalhamento de gravilha, com um ligante modificado com polímeros (Hunter, 2000).

2.1.2. Slurry Superficial

É dividido em duas técnicas distintas, no entanto, com algumas parecenças entre si. Denominam-se Slurry Seal e Microaglomerado Betuminoso a Frio. Ambas são técnicas a frio, isto é, são a *“combinação de um material granular e de um ligante betuminoso de características tais, que se pode manejar, espalhar e compactar à temperatura ambiente”* (Clérigo, 1999-a). As técnicas a frio apresentam diversas vantagens relativamente às técnicas a quente, pelo que começam a ser utilizadas mais frequentemente. As principais vantagens são as seguintes (Clérigo, 1999-a; Branco et al., 2008):

- Menores gastos de energia e conseqüente decréscimo de custos;
- Exigências climatéricas atenuadas;
- Eliminação quase total de fumos e pó para a atmosfera, melhorando significativamente a qualidade do ar;
- O fabrico e a aplicação de misturas utilizando esta técnica torna-se simplificado no que diz respeito às preocupações com o aquecimento dos componentes da mistura e do equipamento.

Existem ainda outros dois tipos de misturas, denominadas misturas betuminosas a quente e misturas betuminosas temperadas. O primeiro tipo é produzido a uma temperatura compreendida entre 150°C e 190°C, dependendo do tipo de betume. Estas temperaturas elevadas garantem, segundo o autor Pereira (2010): *“a secagem dos agregados, o adequado envolvimento do ligante aos agregados, e a trabalhabilidade adequada, para a*

mistura e compactação das mesmas”. Já o segundo tipo pode ser concebido a uma temperatura 10°C ou 40°C abaixo das misturas betuminosas a quente. Apesar das técnicas a frio serem ainda mais eficazes no que diz respeito à temperatura de fabrico e implementação, as misturas temperadas apresentam já as mesmas vantagens das técnicas a frio (relativamente às técnicas a quente), ainda que diminuídas (EAPA, 2010-a; EAPA, 2010-b).

2.1.2.1. Slurry Seal

Podendo também ser denominado como lama asfáltica, o slurry seal surgiu com o objectivo de melhorar as características da superfície dos pavimentos, envelhecidas pelo tempo. Para isso, aplicava-se uma fina camada deste revestimento. Mais tarde, a sua optimização deu origem ao microaglomerado betuminoso a frio.

No Capítulo 4, é abordado mais pormenorizadamente.

2.1.2.2. Microaglomerado betuminoso a frio

De uma forma muito sucinta, define-se microaglomerado como sendo um revestimento superficial para pavimentos, com espessura aproximada a 1cm, e que visa melhorar as características superficiais dos pavimentos (Vicente, 2006).

É um revestimento muito utilizado, visto satisfazer uma grande parte de requisitos necessários a uma utilização segura dos pavimentos onde é aplicado. Para além disso não acarreta elevados custos económicos.

Este é um dos temas abordados no presente estudo, pelo que no capítulo 4, encontra-se a sua descrição pormenorizada.

2.1.3. Slurry Colorido

A maioria dos pavimentos coloridos é fabricada através da adição do pigmento óxido de ferro, que lhe confere a cor vermelha escura. No entanto, o custo deste pigmento é bastante elevado, facto que faz com que o uso de betumes convencionais para este género de misturas seja um inconveniente. Surgiram então os ligantes sintéticos. Este tipo de ligante é passível de ser pigmentado com qualquer cor, uma vez que não possui asfaltos

na sua constituição. O asfalto é um dos constituintes do cruze, e sendo de cor preta, é o elemento que impede a pigmentação. A vantagem do ligante sintético face aos betumes convencionais prende-se com o facto de que no primeiro caso, é necessário uma percentagem de 1 a 2% de pigmento para se obter uma cor satisfatória (qualquer que esta seja), enquanto que no segundo caso, é inevitável uma percentagem de 5% de óxido de ferro para se obter a cor vermelha escura.

Este é o terceiro método abordado neste trabalho, presente no Capítulo 5.

2.1.4. Argamassa betuminosa

Esta é uma mistura betuminosa a quente, composta por ligante e agregados de dois tamanhos diferentes. A argamassa betuminosa pode ser utilizada tanto em camada de regularização, como em camada de desgaste. Para o primeiro caso, a camada deve apresentar uma espessura entre 2 cm e 4 cm. Para o segundo caso, é necessário que o pavimento esteja apenas sujeito a tráfego leve (Branco et al., 2008). O facto de possuir uma quantidade considerável de agregados finos, confere ao pavimento pouca resistência ao atrito, pelo que se pode melhorar esta propriedade, por exemplo, frisando a superfície com um equipamento adequado, enquanto esta ainda se encontra quente (Hunter, 2000). Segundo o autor Vicente (2006), *“nas situações de fendilhamento generalizado, e perante a necessidade de retardar uma reabilitação estrutural, poderá ser uma alternativa de curto prazo, dado que apresenta uma boa capacidade de se adaptar a deformabilidades acentuadas”*. O presente tipo de tratamento superficial apresenta ainda uma boa impermeabilidade, uma vez que o teor de vazios não ultrapassa 1%.

2.1.5. Pavimentos anti-derrapantes

Segundo um estudo realizado pelo órgão de gestão política de Londres, GLC (Greater London Council), 70% dos acidentes de viação ocorrem nas imediações das zonas de conflito (15 metros), como por exemplo cruzamentos e passadeiras. Outros pontos perigosos são, por exemplo, descidas de inclinação acentuada, curvas perigosas e

aproximação a pontes. Este facto deve-se frequentemente a uma baixa resistência à derrapagem do pavimento.

Foram então desenvolvidos diversos tipos de revestimentos anti-derrapantes, adequados para as zonas referidas anteriormente, em que as camadas a aplicar são ultra-finas. Os materiais utilizados são diferentes espécies de resinas, que são extraídas de plantas, e podem ser aplicadas a quente ou a frio, consoante o tipo (Hunter, 2000).

2.2. Tipos de equipamentos para aplicação de tratamentos superficiais

Existem diversos tipos de equipamentos para a aplicação de misturas. Estes são escolhidos conforme a mistura em causa. Seguem-se alguns exemplos:

- **Sprayers:** São as chamadas "caldeiras" e distribuem o betume. Trata-se de equipamentos bastante sofisticadas que são programadas para espalhar diferentes quantidades de betume conforme os locais mais ou menos danificados, as marcas de rodas, e as zonas mais ou menos ricas em ligante, etc.
- **Gravilhadores:** São acoplados a camiões de transporte de agregados e permitem uma aplicação rápida dos agregados, de uma forma uniforme e precisa.
- **Cilindros:** São o equipamento mais utilizado para fazer a união entre o ligante e os agregados sem que estes quebrem. Os cilindros de rolos e de pneus são os geralmente usados na produção dos tratamentos superficiais.
- **Vassouras:** São necessários para varrer o excesso de agregados que se encontra à superfície do pavimento, para que estes não constituam um perigo para os utilizadores, devido à sua possível projecção à passagem dos veículos. Servem também para a limpeza das superfícies de pavimentos antes da aplicação dos tratamentos superficiais.

2.3.Factores que condicionam o dimensionamento e o desempenho dos tratamentos superficiais

É importante ter em atenção factores muito diversificados para que os tratamentos superficiais tenham um bom desempenho ao longo da sua vida útil. Estes factores são os seguintes (Hunter, 2000; Read et al., 2003):

- Textura da superfície e resistência à derrapagem;
- Volume de tráfego e velocidade;
- Tamanho, assim como outras características dos agregados;
- Tipo (e quantidade) de ligante;
- Aderência;
- Características geométricas do traçado, altitude, latitude e circunstâncias do local;
- Condições e rigidez da superfície já existente;
- Condições meteorológicas aquando da aplicação do revestimento, assim como nos seus primeiros tempos de vida.

É de salientar que este último factor é um dos mais importantes que interfere no desempenho destes tratamentos. Exemplo disto mesmo é a presença de humidade excessiva e a queda de chuva intensa logo após a colocação do tratamento. É então necessário ter em atenção a altura do ano em que estes são colocados no pavimento. Geralmente o início do verão é o período mais indicado. Esta altura, irá proporcionar uma boa ligação entre os agregados e o pavimento, para que no Inverno seguinte, não se desagreguem, visto que será nessa altura que o ligante atinge a sua máxima rigidez e se encontra significativamente vulnerável à rotura frágil. Logo, quanto mais tarde o revestimento superficial for aplicado, maior é a probabilidade de desagregamento dos agregados.

Caso algum destes factores (ou vários) tenha sido negligenciado, vai potenciar o aparecimento de diversas anomalias nos pavimentos, incluindo a rotura. Esta rotura pode acontecer de diversas formas, as quais estão seguidamente descritas.

2.3.1. Mecanismos de rotura

Como é normal, os pavimentos estão sujeitos à degradação ao longo da sua vida. Se algum factor tiver sido descorado aquando da sua construção, ou até da conservação e reabilitação, é possível dar-se a rotura, que pode apresentar várias formas (Read et al., 2003):

- Perda de agregados imediatamente ou pouco depois da colocação;
- Perda de agregados durante o primeiro Inverno;
- Perda de agregados nos anos seguintes;
- Refluir do betume durante o primeiro Verão intenso;
- Perda progressiva de rugosidade nos anos seguintes.

3. EMULSÕES BETUMINOSAS – NOÇÕES BASE

Foi já abordado no Capítulo 1, a forma como surgiram as emulsões betuminosas. É devido à sua elevada importância para a área de vias de comunicação, e em especial para a presente dissertação, que se dedica um capítulo a este tema.

Segundo Branco et al. (2008), “uma emulsão betuminosa é um sistema heterogéneo de duas fases, consistindo em dois líquidos imiscíveis, betume e água, e que se mantém estável devido ao emulsionante que se distribui à volta dos glóbulos de betume, mantendo assim o sistema em equilíbrio”.

As emulsões betuminosas podem servir para fazer a ligação entre as diversas camadas dos pavimentos (quando utilizadas com esta função podem também ser chamadas de “colas”) ou, como é o caso do estudo apresentado no presente trabalho, para incorporar as próprias camadas.

De uma forma muito genérica, são constituídas por água, emulsionante, betume e um ou mais aditivos. Mais à frente, expõe-se cada um destes componentes, assim como as respectivas funções.

3.1. Classificação das emulsões betuminosas e suas propriedades

As emulsões betuminosas podem ser classificadas de diversas formas, e dependendo do fim a que se destinam, são produzidas utilizando produtos (e quantidades) com características adequadas a esse fim.

A sua nomenclatura é composta pela combinação de caracteres com diversos significados. Supondo uma emulsão denominada “WXYZ”, estes caracteres podem possuir os seguintes significados (RF, 2008):

W → É representado por um “C” no caso de a emulsão ser catiónica, ou um “A” no caso de a emulsão ser aniónica;

X → Indica o teor em betume residual presente na emulsão, em percentagem;

Y → Indica os constituintes da emulsão. É representado apenas por um “B” caso se trate de um betume base; se o betume estiver modificado com polímeros, coloca-se “BP”; para o caso da emulsão conter uma percentagem de

fluidificante superior a 2%, é representada por um “F”. No entanto, é possível e necessário conjugar as designações anteriores. O caractere “Y” pode ser representado por “BF” quando se trata de um betume base com uma percentagem de fluidificante superior a 2%. Se a emulsão for constituída por betume modificado com polímeros e contiver uma percentagem de fluidificante superior a 2%, representa-se por “BPF”;

Z → Indica a classe de rotura da emulsão.

Cada um destes parâmetros é aprofundado pormenorizadamente, mais à frente neste trabalho. O caso desenvolvido envolveu o fabrico e análise de emulsões do tipo C60B5, isto é, emulsões catiónicas com 60% de betume base na sua constituição, e com uma classe de rotura 5.

De seguida, apresentam-se os diversos tipos de classificações que se podem atribuir às emulsões.

3.1.1. Classificação quanto ao tipo de fases

As emulsões são constituídas essencialmente por água e betume. Dividem-se ainda, em duas fases: fase contínua e fase descontínua (ou dispersa). Estas duas fases correspondem à água e ao betume, mas não respectivamente. Esta correspondência é variável. Por este motivo, é possível afirmar que, classificando as emulsões quanto ao seu tipo de fase, existem três tipos de emulsões:

- Emulsões directas: a fase dispersa é o betume, e a fase contínua é a água. Podem ser representadas por L/H (betume em água). É esta a composição utilizada na maioria das emulsões;
- Emulsões inversas: a fase dispersa é a água, e a fase contínua é o betume. Podem ser representadas por H/L (água em betume);
- Emulsões duplas ou múltiplas: a fase dispersa é já considerada uma emulsão (H/L), que irá ser misturada com a fase continua constituída por água. Podem ser representadas por H/L/H (água em betume em água) (RF, 2008; Pereira, 2010).

3.1.2. Classificação quanto à natureza iónica

As emulsões betuminosas podem ser aniónicas (carga negativa), catiónicas (carga positiva), não iónicas (não são carregadas), ou anfotéricas (podem apresentar carga positiva, se estiverem na presença de um pH ácido, comportando-se como catiónicas; ou podem apresentar carga negativa, se estiverem na presença de um pH básico, comportando-se como aniónicas) (RF, 2008). As mais utilizadas são as emulsões betuminosas aniónicas e catiónicas, e como foi referido anteriormente, as emulsões desenvolvidas laboratorialmente no presente trabalho são catiónicas, pelo que serão estas as mais aprofundadas teoricamente.

O elemento que lhes confere a carga é o emulsionante utilizado. Por exemplo, para as emulsões catiónicas, é adicionado à fase aquosa um emulsionante com carga positiva. Quando estes componentes são misturados com a fase betuminosa, esse emulsionante vai-se distribuir à volta das partículas de betume, conferindo-lhes a carga positiva (Figura 6 e Figura 7). No caso das emulsões aniónicas, o processo é análogo, com a diferença da carga do emulsionante ser negativa, conferindo às partículas de betume também uma carga negativa (RF, 2008).

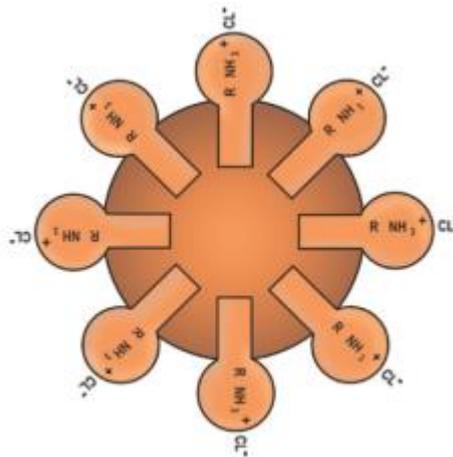


Figura 6. Demonstração da envolvimento das partículas de betume pelo emulsionante numa emulsão catiónica (Bernucci et al., 2008)

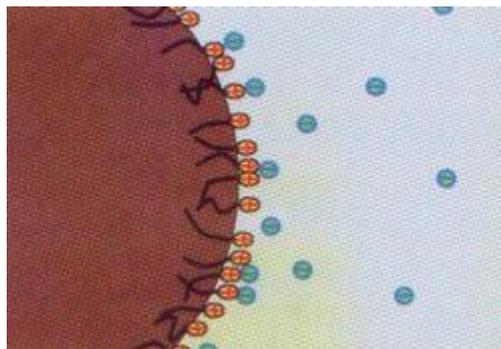


Figura 7. Comportamento do emulsionante na emulsão (Bernucci et al., 2008)

A carga eléctrica do emulsionante vai condicionar a escolha dos agregados. Para proporcionar uma boa adesão entre eles e a emulsão betuminosa, os agregados devem apresentar cargas eléctricas opostas. Sendo assim, para emulsões catiónicas, os agregados devem possuir carga negativa, como o granito, o basalto ou outros agregados silicatados. Para emulsões aniónicas, os agregados devem possuir carga positiva, como o calcário (Pereira, 2010).

3.1.3. Classificação quanto ao pH

Como foi já referido, uma emulsão é ácida, quando se trata de uma emulsão catiónica, e básica quando se trata de uma emulsão aniónica. Esta classificação é feita com base na escala de Sorensen que, varia entre 0 e 14. A uma temperatura de 25°C, para valores inferiores a 7, o pH é ácido; para valores superiores a 7, pH é básico; para o valor 7, considera-se pH neutro (Group, 2011). Este é medido conforme a norma EN 12859 (CEN, 2009-e).

Um bom controlo de pH é indispensável para a obtenção de emulsões com determinadas características fundamentais para o seu bom comportamento. Tendo em consideração este aspecto, para emulsões aniónicas, o pH deverá estar compreendido entre 8 e 12. Relativamente às emulsões catiónicas, o pH deve estar compreendido entre 3 e 5 (RF, 2008). Para estas emulsões, quando se cumpre o intervalo referido, a adesão entre emulsão e agregados será bastante eficaz, assim como melhorará a estabilidade da emulsão ao armazenamento. O aumento do pH provoca ainda o aumento do índice de rotura

(parâmetro exposto mais à frente no presente trabalho), sendo uma medida de controlo de aplicação da emulsão bastante eficaz.

No entanto, o pH das emulsões é controlado na fase aquosa (Garrido, 1999), o que faz com que o valor apresentado pela emulsão possa ou não, sofrer alteração. Este mantém-se, caso não exista uma migração dos componentes químicos da fase betuminosa para a fase aquosa. Contudo, nas emulsões catiónicas, existe uma migração de componentes provenientes do betume, o que acarreta um ligeiro incremento do pH na emulsão (RF, 2008). Este facto deve-se à diminuição da quantidade de iões H^+ , os iões responsáveis pela acidez das soluções. Sendo assim, é necessário atribuir à fase aquosa um valor de pH ligeiramente diferente do valor pretendido para a emulsão final. Logo, para as emulsões aniónicas, deve-se acertar o pH da fase aquosa entre 7.5 e 10.5. Para as emulsões catiónicas, este deve estar compreendido entre 2 e 3.

O pH condiciona, em conjunto com o emulsionante, a carga eléctrica da emulsão, e o seu controlo é realizado através da adição de ácido clorídrico (HCl) no caso das catiónicas, e no caso das aniónicas com hidróxido de sódio (NaOH).

3.1.4. Classificação quanto à velocidade de rotura

As emulsões podem também ser classificadas consoante a sua velocidade de rotura, factor de elevada importância para a sua caracterização. Chama-se processo de rotura à separação irreversível entre as fases dispersa e contínua, com a conseqüente evaporação da água (ProbiGalp, 2010-b).

Existem dois tipos de rotura distintos: rotura rápida e rotura progressiva. Para o primeiro caso, a emulsão rompe rapidamente após o fabrico da emulsão, não sendo possível a sua recuperação como emulsão, dado que as duas fases se separam definitivamente. A fase aquosa pode evaporar ou permanecer em formato líquido na mistura. O segundo caso dá-se lentamente, e deve-se ao tempo de armazenagem da emulsão. Este tempo põe em destaque a diferença de densidade entre ambas as fases que, por gravidade, se separam, provocando a sedimentação da mistura. Este caso é reversível ao agitar a emulsão (Pereira et al., 1999).

As emulsões betuminosas podem ser classificadas como sendo de rotura lenta, rotura média, ou rotura rápida, e são classificadas numa escala de 0 a 7, de acordo com a norma EN 13808 (CEN, 2005), sendo que a velocidade de rotura aumenta no sentido decrescente da escala.

Dependendo da utilização que se pretende dar à emulsão, é necessário um determinado tempo de rotura, e é este um dos aspectos que levam à escolha da emulsão a utilizar. De seguida, apresentam-se as possíveis aplicações das emulsões, para cada tipo de rotura (Pereira, 2010; ProbiGalp, 2011-a):

Tabela 1. Aplicabilidade das emulsões, consoante o seu tipo de rotura

Emulsões de Rotura Lenta	Emulsões de Rotura Média	Emulsões de Rotura Rápida
Regas de impregnação; Emulsão de impregnação; Reciclagem; Estabilização; Misturas betuminosas a frio.	Misturas betuminosas a frio; Misturas abertas a frio; Misturas temperadas.	Revestimentos superficiais; Regas de colagem e impregnação de geotêxteis; Regas de colagem especiais; Misturas betuminosas a frio.

Esta propriedade das emulsões betuminosas é obtida através de um ensaio descrito no capítulo 4.2.4 mais à frente no presente trabalho e denomina-se “Determinação do índice de rotura de emulsões com filer”, sendo baseado na norma EN 13075-1 (CEN, 2009-b).

3.1.5. Classificação quanto à percentagem de betume presente na emulsão

Segundo os autores Branco et al. (Branco et al., 2008), a percentagem de betume normalmente presente nas emulsões está compreendida entre 55% e 65%, em massa. Já Garrido (1999) afirma estar entre 50% e 70%. No entanto, as emulsões de impregnação contêm percentagens de betume que chegam a ser inferiores a 50%, como por exemplo, uma emulsão do tipo C50BF5, onde o fluidificante poderá estar compreendido entre 5% e 15%, logo a percentagem de betume pode ser de 45% (ProbiGalp, 2011-b).

3.1.6. Classificação quanto ao tamanho das partículas de betume

O comportamento da emulsão no momento em que entra em contacto com os agregados é um aspecto bastante relevante e que deve ser tido em conta. Para além da carga eléctrica da emulsão ter que ser contrária à dos agregados, como foi já referido, um outro factor que influencia este comportamento é o tamanho das partículas de betume da emulsão. Estas têm interferência nos seguintes aspectos (Engman et al., 1998):

- Possibilitam a determinação da superfície específica da emulsão, isto é, a área de contacto entre as partículas de betume e a água. Quanto menor o tamanho médio das partículas, menor quantidade de emulsionante livre (emulsionante que não está ligado à superfície das partículas de betume) existirá na mistura, e mais rápida será a modificação da carga da superfície dos agregados, reduzindo assim a sua reactividade para com as partículas de betume.
- Afectam a mobilidade das próprias partículas de betume na superfície dos agregados, em conjunto com a carga eléctrica da superfície. Quanto menor o tamanho médio das partículas, a sua mobilidade será superior.
- Quanto menor o tamanho médio das partículas, mais facilmente estas penetram na fracção mais fina dos agregados presentes na mistura.

Geralmente, as emulsões não apresentam tamanhos muito semelhantes para as partículas de betume. Estas denominam-se poli dispersas. As que possuem tamanhos de partículas semelhantes (e por isso um desvio padrão reduzido) são designadas de mono dispersas, no entanto são muito difíceis de obter e presentemente são produzidas apenas como produtos experimentais (RF, 2008).

Para emulsões betuminosas no geral (RF, 2008), faz a seguinte separação, no que diz respeito ao tamanho das partículas de betume, em micrones ($1\mu m = 1 \times 10^{-6}m$):

- micro emulsões: $0.01 \mu m$ a $0.05 \mu m$
- macro emulsões (onde estão incluídas as emulsões betuminosas): $0.2 \mu m$ a $0.5 \mu m$
- nano emulsões ou mini emulsões: $0.03 \mu m$ e $0.5 \mu m$

No entanto, as emulsões betuminosas utilizadas na produção de microaglomerados não se encontram incluídas nas anteriores. Não existe ainda um valor, ou intervalo de valores, que se atribua como exigência para o presente caso. No entanto, existem alguns estudos que permitem estabelecer um valor padrão para os tamanhos médios que devem ser atingidos para as partículas de betume. Segundo um estudo publicado por Engman et al. (Engman et al., 1998), o tamanho médio das partículas de betume para emulsões apropriadas para slurry superficial, está compreendido entre 2 μm e 5 μm , aproximadamente. Já RF (2008) apresenta um intervalo entre 6 μm e 8 μm , aproximadamente. Por sua vez, os autores Bernucci et al. (2008) indicam um intervalo de 1 μm e 20 μm . No presente estudo encontrou-se um óptimo compreendido entre 8 μm e 12 μm .

Para se obter o tamanho pretendido para as partículas de betume, é necessário ter em conta os factores que contribuem para a sua variação, nomeadamente, a velocidade de rotação do moinho, o tipo de emulsionante presente na emulsão, e a temperatura das fases aquosa e betuminosa (Garrido, 1999).

3.1.7. Classificação quanto à natureza

As emulsões podem ser convencionais ou modificadas. As modificadas, como o próprio nome indica, sofrem uma alteração na sua constituição. Esta alteração pode ser efectuada no betume que vai entrar na emulsão, adicionando-lhe um composto específico, ou em alternativa, na própria emulsão, após a sua produção, adicionando-lhe também um composto. Já as emulsões convencionais não gozam de qualquer modificação.

3.2. Outras propriedades

3.2.1. Viscosidade

É um parâmetro das emulsões que se determina através de um ensaio descrito mais à frente capítulo 4.2.6. Trata-se de uma característica de extrema importância, e que se

relaciona directamente com a percentagem de betume residual da emulsão, isto é, quanto maior for esta percentagem, maior será a sua viscosidade. A percentagem de betume condiciona a temperatura a que se deve armazenar as emulsões, que será também directamente proporcional aos dois parâmetros anteriores (Pereira et al., 1999).

A viscosidade da emulsão varia ainda com o tamanho médio das partículas de betume, sendo estes inversamente proporcionais (Garrido, 1999).

3.2.2. Estabilidade durante o armazenamento e o transporte

Chama-se estabilidade à orientação que as moléculas de emulsionante adoptam, e que origina a formação de uma camada de água de solvatação, isto é, uma camada que impede que as partículas de betume entrem em contacto directo entre si, desviando-se umas das outras. Este desvio ocorre uma vez que os glóbulos de betume ficam envolvidos por uma carga eléctrica (positiva para emulsões catiónicas, e negativa para emulsões aniónicas), provocando uma repulsão electrostática, dado que partículas com o mesmo sinal repelem-se. Desta forma, evita-se que a emulsão se separe em duas fases distintas, conferindo-lhe a dita estabilidade (Pereira et al., 1999).

Durante o armazenamento, é de elevada importância que a emulsão desfrute de uma boa estabilidade, em detrimento de se tornar inutilizável. Caso isto não aconteça, existem três fenómenos que podem ocorrer. Trata-se de estados de separação e podem ser observados na Figura 8.

O mais comum denomina-se sedimentação e é uma operação unitária, que consiste num movimento vertical das partículas, numa mistura homogénea, provocando a sua deposição no fundo do recipiente. Transpondo este processo para as emulsões, as partículas de betume em suspensão movem-se verticalmente, devido à força da gravidade, fazendo com que estas se depositem no fundo do reservatório. Geralmente, a densidade dos glóbulos de betume é superior à densidade da fase aquosa, sendo este o motivo do depósito das partículas no fundo. No entanto, existem casos em que a densidade dos glóbulos de betume é inferior à densidade da fase aquosa, o que origina a elevação destas partículas para o topo do reservatório. Este é também um caso de sedimentação, e denomina-se de

cremificação. Ambos são reversíveis apenas com uma leve agitação da emulsão (Pereira et al., 1999).

É possível determinar a velocidade de sedimentação de uma emulsão, através da expressão que se segue:

$$v = \frac{2 \times g \times r^2 \times (d_1 - d_2)}{9 \times \eta} \quad (1)$$

Em que:

$v \rightarrow$ Velocidade de sedimentação (m/s)

$g \rightarrow$ Força da gravidade (9,8 m/s²)

$r \rightarrow$ Raio médio das partículas de betume (m)

$d_1 \rightarrow$ Peso específico do betume (kg/m³)

$d_2 \rightarrow$ Peso específico da fase aquosa (kg/m³)

$\eta \rightarrow$ Viscosidade da fase aquosa (m²/s)

Observando a equação anterior, é simples compreender quais os parâmetros a alterar para diminuir a velocidade de sedimentação, isto é, para evitar que ocorra:

- Diminuir o tamanho das partículas de betume, dado que uma emulsão com partículas de tamanho elevado sedimenta mais rapidamente devido à massa das partículas e às forças de repulsão entre elas. Logo, uma emulsão com um tamanho médio de partículas adequado, mas com um desvio padrão elevado, também não é muito favorável para a não ocorrência de sedimentação.
- Diferença de densidades entre as fases aquosa e betuminosa, que deve ser diminuída. Para isso, pode-se diminuir o peso específico do betume, adicionando-lhe petróleo, e aumentar o peso específico da fase aquosa, adicionando-lhe um sal inorgânico (como por exemplo, cloreto de cálcio) (Pereira et al., 1999).
- Aumentar a viscosidade da fase aquosa, o que também irá diminuir a velocidade de sedimentação da emulsão. Esta relação baseia-se na lei de Stokes, que relaciona o movimento vertical de um corpo num meio viscoso, e a resistência que esse meio impõe à queda desse corpo. Quanto maior a resistência oferecida pelo meio, menor será a velocidade de queda. Transportando esta lei

para o presente caso, quanto maior a viscosidade da fase aquosa, mais lentamente as partículas de betume se depositarão no fundo do reservatório, isto é, menor será a velocidade de sedimentação da emulsão (Lima et al., 2001). Para isso, pode-se aumentar a percentagem de betume residual presente na emulsão, aumentar também a quantidade de emulsionante (dado que aumenta a homogeneidade do meio, uma vez que estabiliza as cargas eléctricas no sistema, tornando a dispersão de betume mais estável), diminuir o tamanho das partículas de betume e a viscosidade do betume (tornando-se mais leves, e menos influenciadas pela força da gravidade), e por fim, alterar o pH da fase aquosa (Pereira et al., 1999). Este último factor interfere da seguinte forma (para as emulsões catiónicas): um pH muito baixo e uma força electrostática muito elevada atribui tensão ao sistema, destabilizando-o e podendo induzir uma rotura precoce; já um pH muito elevado e uma força electrostática reduzida tem o efeito contrário, isto é, as ligações estão mais fracas, levando à instabilidade da dispersão e conseqüente rotura precoce. Para determinar a tendência para a sedimentação de uma emulsão, recorre-se ao ensaio normalizado, exposto na norma EN 12847 (CEN, 2009-d), e descrito mais à frente.

O segundo estado de separação que pode ocorrer no armazenamento é denominado floculação. Este fenómeno é também uma operação unitária e consiste na separação de fases, fazendo com que uma mistura deixe de ser homogénea. Neste caso, as partículas de betume aproximam-se até ficarem com uma distância muito pequena entre elas. Este processo é também reversível, caso sejam utilizados meios mecânicos ou térmicos para agitar a mistura (RF, 2008).

Por último, pode ocorrer coalescência que, tal como a floculação, consiste na união das partículas de betume e separação de fases. No entanto, neste último processo, a união é irreversível, fazendo com que a emulsão deixe de se poder considerar uma emulsão, dado que esta se separa em duas fases definitivamente (RF, 2008).



Figura 8. Fenómenos de Sedimentação, Floculação e Coalescência, respectivamente (RF, 2008)

Ainda no que diz respeito ao armazenamento, é necessário ter em conta mais alguns aspectos para garantir a qualidade das emulsões. Estas podem necessitar de ser aquecidas antes da aplicação, e devem ainda, ser agitadas para que se mantenham homogêneas. Relativamente ao aquecimento, nem sempre os reservatórios possuem um sistema para esse efeito, e sim um isolamento térmico, visto que a emulsão ao ser produzida apresenta-se a uma temperatura alta (40°C a 70°C), pelo que ao ser colocada no reservatório, apenas é necessário manter um valor de temperatura aproximado. Segundo RF (2008), a temperatura de armazenamento deve estar compreendida entre 20°C e 70°C e nunca deve apresentar um valor inferior a 2°C ou 3°C, com a consequência da emulsão atingir a rotura irreversivelmente. Os autores Pereira et al. (1999) acrescentam que a emulsão não deve em nenhum caso ultrapassar os 85°C, pois caso suceda tal situação, a fase aquosa pode evaporar, provocando o aumento da viscosidade da emulsão e a sedimentação das partículas de betume, que em último caso dará origem à rotura irreversível da emulsão. Para os casos em que é necessário aquecer os reservatórios, este aquecimento pode ser feito através de água aquecida, vapor de baixa pressão, resistências eléctricas ou óleos térmicos (este último já não é tão frequente). Os sistemas de agitação ou recirculação podem ser agitadores de hélice ou pás, ou bombas de palhetas (Figura 9). Os agitadores são escolhidos consoante o tipo de escoamento. As bombas de palhetas estão inseridas na categoria de bombas de deslocamento positivo, rotativas, isto é, o líquido que se encontra entre as palhetas, “é deslocado de modo contínuo pelo movimento de rotação desde a

entrada até a saída da bomba” (Müller, 2009). Não se deve utilizar estes sistemas em exagero, com a consequência da possível formação de bolhas de ar na emulsão e espumas, que podem pôr em causa a sua estabilidade. É ainda possível que ocorra a rotura da emulsão, logo estes processos devem ser accionados durante uma hora, a cada 24 horas de armazenamento, aproximadamente (Pereira et al., 1999).

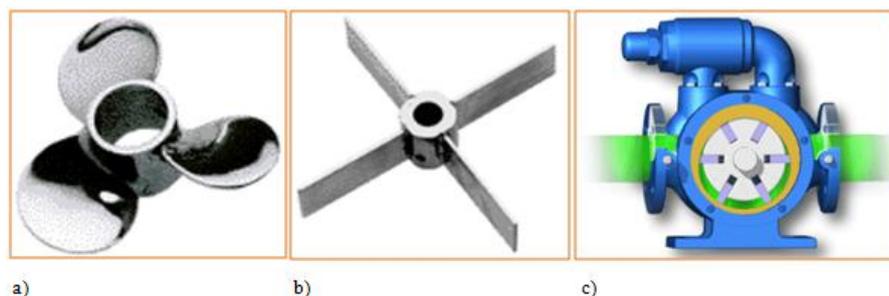


Figura 9. Sistemas de agitação ou recirculação: a) Agitador de hélice; b) Agitador de pás; c) Bomba de palhetas (Engineers, 2006; Químicos, 2007)

Os depósitos mais indicados para o armazenamento são depósitos com formato vertical, para evitar a formação de uma película de betume à superfície da emulsão. Esta película forma-se após um período prolongado de armazenamento, e quanto menor for a quantidade de emulsão em contacto com o ar, menor será a área da película que se formará, daí geralmente não se optar por reservatórios em formato horizontal. Não é prejudicial à emulsão desde que não seja excessiva, e ajuda até a proteger a emulsão do contacto com o ar. Na Figura 10 expõe-se a diferença entre os dois formatos de armazenamento e a consequência relativamente à formação da película (existe a possibilidade desta romper e depositar-se sobre a emulsão, misturando-se com ela, e neste caso sim, prejudicando as suas propriedades).

O material utilizado no interior dos depósitos é também um aspecto relevante. Caso a emulsão apresente um pH muito baixo e permaneça armazenada durante um longo período de tempo, é possível que ocorra a corrosão do depósito. Geralmente os materiais utilizados são os aços carbono normais, mas para estes casos deve-se revestir a parte interior do reservatório com um material resistente à corrosão denominado ebonite. A espessura do revestimento deve ser aproximadamente 4 mm (Pereira et al., 1999).

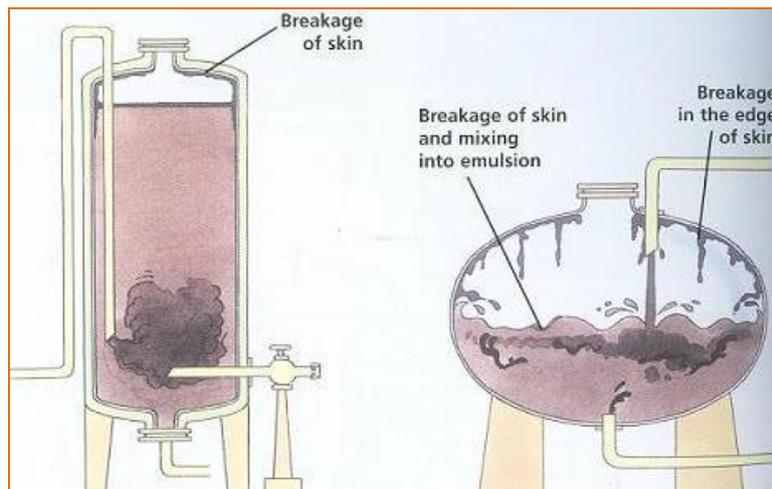


Figura 10. Reservatório indicado para o armazenamento de emulsões, e reservatório a evitar, respectivamente (RF, 2008)

Abordando desta feita, a estabilidade das emulsões betuminosas durante o transporte, esta pode ser avaliada recorrendo a um ensaio que simula a agitação sofrida pela emulsão durante o transporte, e averigua se as partículas de betume se agrupam com essa agitação. No entanto, este agrupamento de partículas que pode originar o fenómeno de coalescência, não é imediato, pelo que este ensaio só deve ser realizado 24 horas após submeter a emulsão à agitação (Pereira et al., 1999).

Ao transportar uma emulsão, tal como no seu armazenamento, é necessário ter em conta alguns aspectos, nomeadamente a conservação da temperatura da emulsão que é efectuada também com sistemas de isolamento térmico. A capacidade dos reservatórios pode variar entre as duas e as 23 toneladas, tendo em consideração que a partir das 8 a 10 toneladas, é necessário compartimentar o reservatório (Figura 11), com o objectivo de evitar uma agitação exagerada da emulsão (que poderia pôr em causa as suas propriedades) e ainda garantir segurança do transporte (estabilidade ao veículo) (Pereira et al., 1999).

É de salientar que após o armazenamento e o transporte, isto é, quando a emulsão for aplicada, a sua estabilidade deve diminuir progressivamente, para que se alcancem bons resultados.



Figura 11. Veículo compartimentado para transporte de emulsões (Pereira et al., 1999)

3.2.3. Adesividade ou Adesão

Entende-se por adesividade, a união entre agregados e ligante, e a capacidade de resistência desta união. Existem, portanto, dois tipos de adesividade: activa e passiva (Figura 12). A adesividade activa é a capacidade detida pelo agregado e pelo substrato de serem envolvidos pelo ligante. A adesividade passiva diz respeito à capacidade que esta união tem de se manter fixa, sendo que o agregado quando coberto pelo ligante, deve resistir a que este último se desloque sob a acção de qualquer força destrutiva, como por exemplo a água. É possível melhorar esta característica adicionando aditivos ao ligante, actuando como promotores de adesividade, ou ainda através da limpeza ou lacagem (revestimento) dos agregados (Roma, 1999; RF, 2008). A adesividade também é superior, quanto maior for o pH da emulsão (apenas para as emulsões catiónicas, dado que para as aniónicas funciona de forma inversa), o que por sua vez, irá provocar uma diminuição da estabilidade da emulsão (Garrido, 1999).

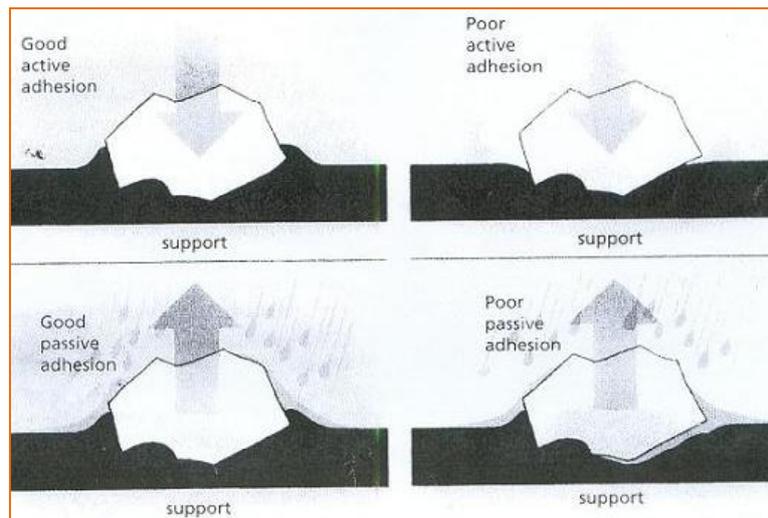


Figura 12. Ilustração dos dois tipos de adesividade em boas e em más condições (RF, 2008)

3.2.4. Coesão

Enquanto a adesividade tende a unir superfícies, por outro lado, a coesão tende a unir as partículas que constituem essas superfícies, ou seja, trata-se de uma força interna e está directamente relacionada com a viscosidade do ligante e com a adesividade activa. Para se obter uma boa adesividade activa, pode-se diminuir a viscosidade do ligante, já que este se torna mais líquido, envolvendo melhor os agregados e o substrato. No entanto, este decréscimo da viscosidade do ligante tem como consequência o seu excessivo amolecimento, o que fomenta uma diminuição da coesão a altas temperaturas. Para evitar este facto, e para que seja possível obter uma favorável adesão e coesão da emulsão, é habitual aditivar o ligante (RF, 2008).

4. EMULSÕES BETUMINOSAS – TRABALHO EXPERIMENTAL

Com o objectivo de se obter uma emulsão betuminosa com boas características, nomeadamente no que diz respeito às propriedades expostas no capítulo anterior, elaborou-se um plano de pesquisa laboratorial com vista a encontrar justamente uma emulsão desse tipo e indicada para microaglomerados.

4.1. Constituintes e Formulação

Como foi já referido, as emulsões são constituídas por água, emulsionante, betume e um ou mais aditivos. No entanto, a sua formulação varia consoante o fim a que se destina. Para o presente caso, foi necessária uma emulsão apropriada para microaglomerados betuminosos a frio, neste caso, do tipo C60B5. Seguidamente apresenta-se um esquema simplificado da produção de emulsões (Figura 13).

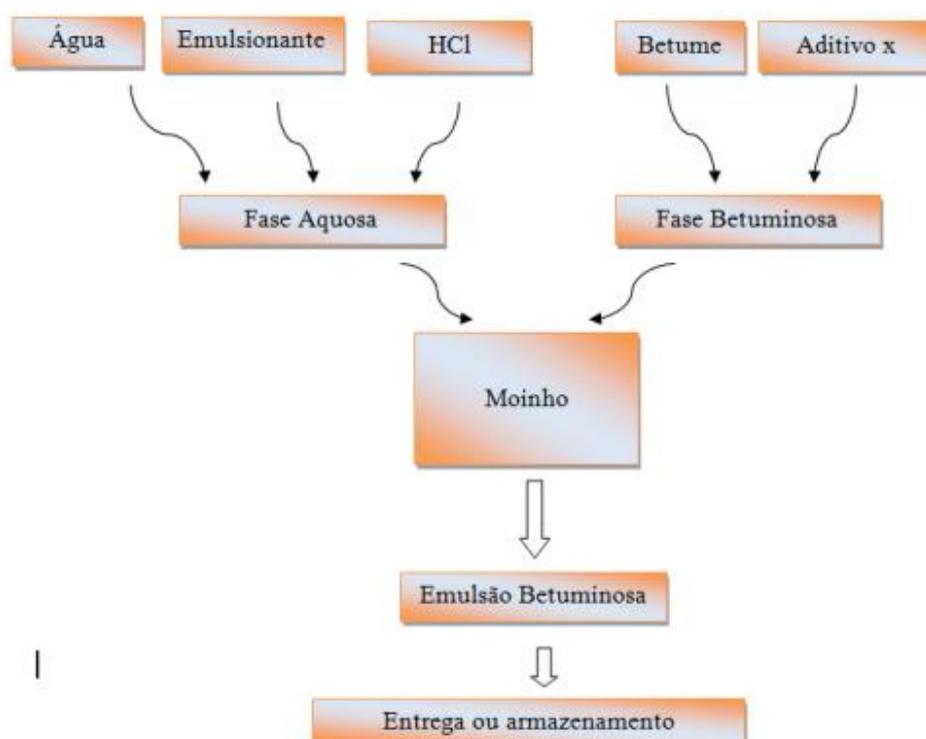


Figura 13. Esquema simplificado do fabrico de emulsões (Adaptado de: RF, 2008)

Por um lado existe a fase aquosa constituída pela água, agente emulsionante e o controlador de pH (ácido clorídrico para emulsões catiónicas, e hidróxido de sódio para emulsões aniónicas). Por outro lado, existe a fase betuminosa constituída por betume e eventualmente algum aditivo. Estas duas fases misturam-se no moinho, dando origem à emulsão betuminosa propriamente dita, que pode ser entregue ao destinatário, ou armazenada nas condições já referidas.

A água utilizada para a mistura, no caso de emulsões catiónicas, não necessita de possuir características específicas, mas apenas estar limpa e sem material orgânico na sua composição. Para emulsões aniónicas é necessário ter em conta mais alguns aspectos, nomeadamente o teor em iões cálcio e magnésio, dado que estes irão influenciar a estabilidade da emulsão (Garrido, 1999).

No que diz respeito ao emulsionante, este deve ser incorporado na emulsão com uma percentagem entre 0.15% e 0.8%, consoante o tipo de emulsão pretendida (Pereira et al., 1999). Tem como funções facilitar a dispersão das partículas de betume no meio aquoso, conferir a mesma carga aos glóbulos de betume, fazendo com que estes se mantenham afastados uns dos outros devido às forças de repulsão, gerando estabilidade à emulsão (e conseqüentemente atribui a carga também à emulsão), e por fim, melhorar a adesividade entre esta e os agregados (Garrido, 1999).

O betume indicado para a produção de microaglomerados é do tipo 80/100, isto é, apresenta um valor de penetração a 25°C entre os 8 e os 10 *mm*. O ensaio à penetração do betume é realizado com base na norma EN 1426 (CEN, 2007-b) e encontra-se descrito no capítulo 4.2.8.1 do presente trabalho.

Por fim, o aditivo adicionado ao betume na fase betuminosa foi um promotor de adesividade. Trata-se de uma mistura de ácidos gordos saturados e insaturados, e tem a função de promover a adesão entre o ligante (emulsão betuminosa) e os agregados.

Foram então produzidas diversas emulsões, todas do tipo C60B5. Os parâmetros que se alteram foram os seguintes:

- Tipo de emulsionante e sua percentagem - foram utilizados dois emulsionantes distintos, denominados “Aditivo M” e “Aditivo J”. As percentagens empregues estão compreendidas nos intervalos 0.15 – 0.4 (representado por “x” no

presente trabalho) e 0.5 – 0.8 (representado por “y” no presente trabalho), relativamente à quantidade de emulsão;

- Origem do betume - foi utilizado betume base originário das refinarias de Matosinhos e de Sines. Independentemente da sua origem, trata-se de betume 80/100.
- Presença ou ausência do promotor de adesão – o promotor de adesão foi adicionado com uma percentagem compreendida entre 0.5 – 1.2, relativamente à quantidade de betume.

Na Figura 14 apresenta-se o equipamento utilizado no fabrico de emulsões em pequena escala.



Figura 14. Instalação piloto para fabrico de emulsões

Na Figura 15, expõe-se um esquema representativo do modo de funcionamento do equipamento acima apresentado. A instalação piloto para fabrico emulsões é composta por dois reservatórios: o da água e o de betume, ambos com agitadores mecânicos e sistema de aquecimento eléctrico. No primeiro reservatório coloca-se a água, de seguida o agente emulsionante e por fim o ácido clorídrico, acertando o pH da mistura (fase aquosa). A temperatura deste reservatório deve estar compreendida entre 40°C a 60°C. No segundo depósito são colocados o betume e o promotor de adesão quando necessário, sendo adicionados por esta ordem. A temperatura estar compreendida entre 135°C e 150°C. Após os componentes de ambos os reservatórios estarem respectivamente misturados, acciona-se

a bomba de água e a bomba de betume, impondo a circulação das misturas de cada reservatório. Estas saem dos depósitos, atravessam a bomba dedicada e voltam ao depósito, nos sentidos indicados na Figura 15. Esta circulação tem diversos objectivos, nomeadamente o acerto da temperatura de cada mistura e respectivas tubagens de circulação (as tubagens da água não necessitam de aquecimento, enquanto que as de betume devem estar à temperatura do betume, garantindo a homogeneização das misturas, e ainda o acerto da rotação pretendida para cada bomba. É o valor da rotação das bombas que estabelece a percentagem de betume obtida na emulsão. A rotação das bombas é específica para o produto e a correspondência ao caudal é obtida pela respectiva rotação.

Após a circulação e estabilização das temperaturas, procedeu-se ao fabrico da emulsão propriamente dita. Para isso fez-se passar os componentes de ambos os reservatórios pelo moinho, recolhendo de seguida a emulsão. O moinho é um elemento com elevada importância neste processo. É composto por um rotor (elemento que gira em torno de si próprio) e um extractor, que se mantém fixo. A emulsão, ao entrar para o moinho, terá que transpor o espaço existente entre estes dois componentes, que é de décimas de milímetro, pelo que é esta passagem que provoca a separação do betume em partículas muito reduzidas. Estas partículas misturam-se com a fase aquosa, ocorrendo uma distribuição do agente emulsionante em redor das partículas de betume, impedindo que estas se voltem a agrupar, e conferindo estabilidade à emulsão. É esta a causa da elevada importância do moinho coloidal na formulação das emulsões (Garrido, 1999).

A rotação utilizada no fabrico das emulsões foi fixa em 7000 *rpm*. Este valor de rotação garantiu a obtenção de resultados aceitáveis para o tamanho das partículas de betume. Conforme referido no capítulo 3.1.6, estabeleceu-se o tamanho de 8 a 10 microns como óptimo.

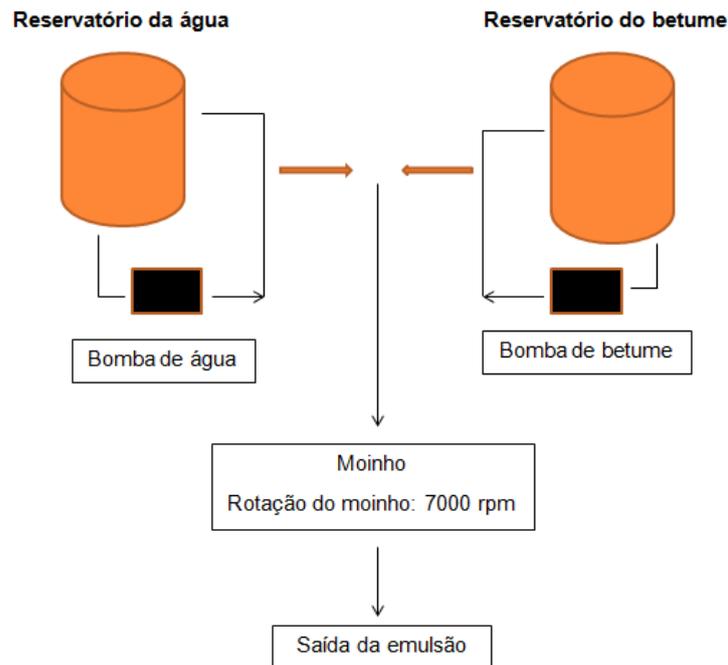


Figura 15. Processo do fabrico de emulsões betuminosas

As emulsões após produzidas foram totalmente analisadas, de forma a averiguar a sua aptidão para serem incorporadas no microaglomerado betuminoso a frio. A emulsão utilizada para o fabrico de microaglomerado é uma emulsão modificada. A modificação induzida tem como objectivo “*melhorar algumas propriedades ou a compatibilização química com materiais utilizados nas misturas betuminosas*” (Galp Energia, 2010), nomeadamente (Vicente, 2006):

- Reduzir a sensibilidade da mistura à água, e a valores extremos de temperatura;
- Melhorar a adesividade aos agregados;
- Melhorar a resistência ao desgaste, à deformabilidade e à fadiga.

4.2. Ensaio de caracterização das emulsões

São diversos os ensaios que se usam para caracterizar as emulsões. Através deles, é possível averiguar se uma emulsão se encontra dentro dos parâmetros normalizados. Estes parâmetros encontram-se especificados na norma EN 13808 (CEN, 2005). Seguidamente

faz-se uma apresentação resumida de cada um dos métodos usados para obter os referidos parâmetros.

4.2.1. Evaporação simples

Trata-se da determinação da percentagem de betume residual contida na emulsão. No presente trabalho, dado que as emulsões produzidas são do tipo C60B5, isto é, contêm cerca de 60% de betume na sua constituição, o ensaio, deve ter como resultado exactamente essa percentagem de betume. Para esta determinação, utilizou-se um método interno da empresa, que consiste em colocar um pouco de emulsão num recipiente resistente ao calor, e recorrendo a um Bico de Bunsen, fazer com que os constituintes da emulsão, excepto o betume, evaporem. Ficando apenas o betume no fundo do recipiente, a percentagem pretendida é dada pela seguinte expressão (2):

$$r = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100\% \quad (2)$$

Em que:

$r \rightarrow$ *Betume residual (%)*

$m_1 \rightarrow$ *Massa do recipiente (g)*

$m_2 \rightarrow$ *Massa do recipiente com a emulsão (g)*

$m_3 \rightarrow$ *Massa do recipiente com o resíduo (g)*

É apenas um ensaio indicativo e a primeira caracterização da emulsão. Este ensaio não consta na lista de ensaios normalizados, no entanto, sendo um ensaio expedito, de curta duração e de fácil execução, permite uma primeira abordagem à percentagem de betume presente na emulsão. Em contexto laboratorial e em processo de investigação e desenvolvimento, representa uma optimização de tempo e recursos.

4.2.2. Determinação do valor de pH

É um ensaio de extrema simplicidade, e é realizado de acordo com a norma EN 12850 (CEN, 2009-e). Consiste em mergulhar o eléctrodo de um dispositivo de medição de pH e uma sonda de temperatura na emulsão e registar ambos os valores apresentados.

4.2.3. Determinação do resíduo de peneiração

Este ensaio é realizado com base na norma EN 1429 (CEN, 2009-a). O objectivo é determinar a percentagem de partículas com diâmetros superiores a 0.500 mm (3). Sumariamente, consiste em fazer passar uma quantidade de emulsão (de massa conhecida) por um peneiro com uma abertura de 0.500 mm (Figura 16). Depois de o peneiro ser lavado e seco, determina-se a massa de resíduos que ficou retida no peneiro. É de salientar que existem alguns pormenores que não podem ser descorados, visto que podem pôr em causa os bons resultados do ensaio. É necessário, por exemplo, colocar a emulsão em banho-maria a 25°C antes de ser peneirada. A solução de lavagem do peneiro deve ser uma solução própria para emulsões betuminosas. Esta solução depende da natureza iónica da emulsão (catiónica ou aniónica). No presente caso, trata-se de uma emulsão catiónica, logo é necessária uma solução denominada “Sc”, que é composta por ácido clorídrico e cloreto frimethylammonium, como é possível verificar também na norma EN 1429 (CEN, 2009-a).

$$R_{0.500} = \frac{m_2 - m_1}{m_{E,0.500} - (m_{C,R} - m_C)} \times 100 \quad (3)$$

Em que:

$R_{0.500}$ → Percentagem de resíduo retido no peneiro 0.500 mm

m_1 → Massa do peneiro 0.500 mm com o respectivo fundo (g)

m_2 → Massa do peneiro 0.500 mm com o respectivo fundo e os resíduos (g)

$m_{E,0.500}$ → Massa da emulsão peneirada no peneiro 0.500 mm (g)

$m_{C,R}$ → Massa do recipiente com os resíduos (g)

m_C → Massa do recipiente vazio (g)



Figura 16. Peneiro de 0.500 mm e o respectivo fundo

É relevante ter em consideração que os restantes ensaios de caracterização das emulsões são realizados com a emulsão que passa neste peneiro.

4.2.4. Determinação do índice de rotura

Este ensaio permite determinar a estabilidade das emulsões betuminosas. Partindo de aproximadamente 100 g de emulsão betuminosa, vai-se adicionando filer continuamente, rodando o recipiente no sentido oposto ao do agitador (Figura 17). A rotura acontece quando se observa uma separação dos componentes da emulsão, ou quando a mistura fica de tal forma densa, que o próprio agitador consegue rodar o recipiente. Por fim, determina-se a massa de filer que foi adicionada à emulsão. A estabilidade da emulsão betuminosa é directamente proporcional à quantidade de filer adicionado (que é calculada considerando o valor da massa da emulsão a ensaiar, e a massa da emulsão após a adição do filer). O valor do índice de rotura calculado no final é adimensional (RF, 2008) e determina-se com recurso à equação (4). No entanto, é um ensaio um pouco empírico, visto que está dependente de uma observação visual, e como tal, dependente do operador que a realiza. Sendo assim, o resultado final é bastante oscilante. O presente ensaio foi executado com base na EN 13075-1 (CEN, 2009-b).

$$BV = \frac{m_f}{m_e} \times 100 \quad (4)$$

Em que:

$BV \rightarrow$ Índice de Rotura

$m_f \rightarrow$ Massa de fíler (g)

$m_e \rightarrow$ Massa de emulsão (g)



Figura 17. Ensaio ao índice de rotura

4.2.5. Determinação das percentagens de betume residual e fluidificante através de destilação

O objectivo desta destilação é determinar as percentagens de fluidificante (caso exista) e de betume residual presentes na emulsão (este último já estimado aquando da evaporação simples), comparando-as com valores normalizados, constantes na EN 13808 (CEN, 2005).

Partindo de uma quantidade conhecida de emulsão, esta é submetida à acção de calor, que provoca a evaporação da água e do fluidificante presentes na emulsão. Estes dois componentes atravessam um dispositivo de arrefecimento e depositam-se na proveta graduada, onde são medidos, como se pode observar na Figura 18. É necessário também executar as pesagens da emulsão antes e após a destilação. Com todos estes valores, procede-se ao cálculo das percentagens de fluidificante e betume residual, através das equações (5) e (6). Todo este processo é executado segundo a norma EN 1431 (CEN, 2009-c).

$$r = \frac{B_m}{A_m} \times 100 \quad (5)$$

Em que:

$r \rightarrow$ *Betume residual (%)*

$A_m \rightarrow$ *Massa da emulsão (g)*

$B_m \rightarrow$ *Massa dos resíduos após a destilação (g)*

$$o = \frac{D \times \rho}{A_m} \times 100 \quad (6)$$

Em que:

$o \rightarrow$ *Fluidificante (%)*

$D \rightarrow$ *Volume de óleo destilado (mL)*

$\rho \rightarrow$ *Densidade da emulsão (1g/mL)*



Figura 18. Processo de destilação, com destaque para a proveta contendo a água e o emulsionante evaporados

4.2.6. Determinação do tempo de escoamento através de um viscosímetro de fluxo

Este ensaio tem como objectivo determinar o tempo de escoamento de 50 mL de emulsão para uma proveta graduada, através de um dispositivo com um orifício que pode

ter 2 mm, 4 mm, ou 10 mm de diâmetro. Deve-se iniciar o ensaio utilizando o dispositivo de maior diâmetro. Caso a emulsão demore menos do que 5 segundos a escoar, o ensaio é rejeitado, sendo repetido desta vez com um dispositivo de diâmetro inferior, e assim sucessivamente. A emulsão deve estar a uma temperatura de 40°C. O equipamento utilizado para este ensaio é denominado viscosímetro de fluxo (Figura 19) e a norma aplicável é a EN 12846 (CEN, 2002-c). Conhecido este tempo, é possível concluir se a emulsão tem ou não viscosidade definida para o tipo de emulsão em causa, comparando o valor encontrado com o intervalo de tempo definido para cada tipo de emulsão e aplicação respectiva (EN 13808 – CEN, 2005).



Figura 19. Viscosímetro de fluxo

4.2.7. Determinação da tendência para a sedimentação

O objectivo é avaliar a tendência que, ao fim de 7 dias de armazenamento, uma emulsão apresenta para a sedimentação. Este armazenamento é realizado à temperatura ambiente numa proveta graduada de sedimentação (Figura 20). Ao fim de 7 dias, retiram-se as partes superior e inferior da emulsão para dois recipientes distintos, através de dois orifícios existentes na proveta, procedendo-se às suas evaporações simples (método descrito anteriormente) para se obter a percentagem de betume residual presente à superfície e no fundo da emulsão. Determina-se também o teor em água da emulsão, em percentagem, no topo e na base da proveta, e o resultado final do ensaio (tendência para a sedimentação, ST) é dado pela diferença entre esses dois valores. Se o valor for positivo

(teor de água no topo superior ao do fundo), significa que as partículas de betume apresentam uma tendência a sedimentar para o fundo. Caso seja negativo, estas ascendem à superfície da emulsão. As normas a seguir são as EN 1428 (CEN, 1999-a) e EN 12847 (CEN, 2009-d), e as expressões utilizadas nos cálculos são as seguintes:

$$T_1 = m_e - m_r \quad (7)$$

$$T_2 = \frac{T_1}{m_e} \times 100 \quad (8)$$

$$ST = a - b \quad (9)$$

Em que:

$T_1 \rightarrow$ Teor em água (g)

$T_2 \rightarrow$ Teor em água (%)

$m_e \rightarrow$ Massa da emulsão (g)

$m_r \rightarrow$ Massa do resíduo (g)

$ST \rightarrow$ Tendência para a sedimentação – teor em água (%)

$a \rightarrow$ Teor em água no topo (%)

$b \rightarrow$ Teor em água no fundo (%)



Figura 20. Armazenamento da emulsão numa proveta de sedimentação

4.2.8. Recuperação do resíduo por evaporação

Como o próprio nome indica, o ensaio consiste em recuperar o resíduo da emulsão, isto é, o betume. É executado com base na norma EN 13074 (CEN, 2002-b), e consiste em colocar um pouco de emulsão num tabuleiro (uma taxa de aplicação entre 1.5 kg/m^2 e 2.0 kg/m^2), espalhando-a bem. Este tabuleiro deve permanecer as 24 horas seguintes à temperatura ambiente, sendo posteriormente colocado numa estufa a 50°C durante mais 24 horas. Durante este processo, todos os constituintes presentes na emulsão irão evaporar, ficando unicamente o betume no tabuleiro. Com este betume procede-se a outros dois ensaios de caracterização: determinação da penetração e determinação do ponto de amolecimento. É também necessário fazer estes dois ensaios ao betume que entrou na emulsão, numa amostra recolhida aquando da sua produção.

4.2.8.1. Determinação da penetração

Consiste na determinação da profundidade a que uma agulha normalizada, por gravidade, penetra no betume durante 5 segundos, a uma temperatura de 25°C . Antes do ensaio é necessário preparar a amostra, colocando o betume numa cápsula e deixando-a tapada à temperatura ambiente durante 90 minutos. De seguida é colocada em banho-maria a 25°C por mais 90 minutos. Só após estes períodos de tempo a amostra está preparada para o ensaio. Todo o ensaio é realizado segundo a norma EN 1426 (CEN, 2007-b) procedendo-se a três medições da penetração, sendo que o resultado final apresentado é a média das três medições (Figura 21).



Figura 21. Penetrómetro semi-automático

4.2.8.2. Determinação do ponto de amolecimento através do método do anel e bola

A determinação do ponto de amolecimento traduz a temperatura à qual o betume amolece, permitindo trabalhá-lo em boas condições. O ensaio é efectuado tendo em conta a norma EN 1427 (CEN, 2007-a). De uma forma sucinta, o ensaio consiste em colocar uma pequena quantidade de betume em dois anéis previamente aquecidos, deixando-os arrefecer. Estes são colocados de seguida num suporte, que por sua vez vai para um copo com água ou glicerina (dependendo do tipo de betume que se está a analisar) a uma temperatura de 5°C ou 25°C, respectivamente. Posteriormente coloca-se uma esfera de aço sobre o betume de cada anel, e procede-se ao aquecimento, com o copo colocado no equipamento apresentado na figura abaixo (Figura 22). A temperatura aumenta 5°C por minuto, até que o betume amoleça ao ponto de deslizar para o fundo do recipiente, em conjunto com a esfera. Regista-se a temperatura a que tal sucedeu, estando concluído o ensaio.



Figura 22. Equipamento para a determinação da temperatura de amolecimento

4.3. Resultados da investigação laboratorial

O plano de ensaios compreendia a produção de emulsões com betumes Galp, originários da Refinaria de Matosinhos e de Sines, com dois agentes emulsionantes distintos (Aditivo M e Aditivo J) e percentagens distintas (0.15-0.4 e 0.5-0.8), e ainda colocar, ou não, o aditivo promotor de adesão no betume, o que deu um total de 16 emulsões betuminosas. Com todas as variações que se fizeram, obteve-se uma grande

quantidade de emulsões. As tabelas seguintes apresentam os valores de referência (Tabela 2), e os valores obtidos (Tabela 3 e Tabela 4).

Tabela 2. Valores de referência para emulsões betuminosas catiónicas para aplicação em microaglomerado betuminoso a frio (ProbiGalp, 2010-c)

Propriedades		Norma	Unidade	C 60 B5 [SLU]	Valores
Propriedades Perceptíveis		EN 1425	-	Classe 1	TBR
Carga das Partículas		EN 1430	-	Classe 2	Positiva
pH		EN 12850	-	-	
Índice de Rotura		EN 13075-1	-	Classe 5	120-180
Teor em Ligante		EN 1428 ou	%	Classe 5	58-62
		EN 1431	%	Classe 5	≥ 58
Teor em Fluidificante		EN 1431	%		
Evaporação Simples (indicativo)		-	%		
Tempo de escoamento, 2 mm a 40°C (Viscosidade)		EN 12846	s	Classe 3	15-45
Resíduo no Peneiro de 0,5 mm		EN 1429	% em massa	Classe 3	≤0,2
Sedimentação (7 dias)		EN 12847	%	Classe 3	≤10
Resíduo de Evaporação [EN 13074]	Penetração do Betume Residual	EN 1426	0,1 mm	Classe 4	≤150
	Determinação da Temperatura de Amolecimento	EN 1427	°C	Classe 4	≥ 43

Tabela 3. Valores obtidos nos ensaios realizados às emulsões betuminosas produzidas com betume base da refinaria de Matosinhos

Propriedades		Valores	Refinaria de Matosinhos							
			Sem Promotor de Adesão				Com Promotor de Adesão			
			Aditivo M		Aditivo J		Aditivo M		Aditivo J	
			X %	Y %	X %	Y %	X %	Y %	X %	Y %
Denominação das Emulsões		----	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
Propriedades Perceptíveis		TBR	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Carga das Partículas		Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva
pH da Fase Aquosa		2-3 3-5	2.21	2.42	2.32	2.27	2.2	2.42	2.35	2.36
pH da Emulsão			1.66	1.58	1.69	2.53	2.77	1.53	3.01	2.64
Temperatura da Emulsão (°C)			21.4	22.9	21.3	22.9	24.9	23	21.2	20.9
Índice de Rotura		120-180	121.4	107.4	121.1	122.4	113.4	110.3	89.9	133.3
Teor em Ligante (%)		58-62	59.2	64.2	59.7	63.1	63.5	65.4	-----	-----
		≥ 58	---	---	---	---	---	---	---	---
Teor em Fluidificante (%)			0	0	0	0	0	0	0	0
Evaporação Simples (indicativo) (%)			58	61.8	59.3	62	61.9	58.2	61	59.4
Tempo de Escoamento, 2 mm a 40°C (Viscosidade) (s)		15-45	40	42	38	38.5	47.5	41	21.5	30.5
Resíduo no Peneiro de 0,5 mm (% em massa)		≤0,2	0.038	0.528	0.008	0.022	0.037	0.023	0.02	0.01
Sedimentação (7 dias) (%)		≤10	-1.7	2.5	9.3	3.4	-----	1.6	-----	17.3
Resíduo de Evaporação [EN 13074]	Penetração do Betume Residual (0.1 mm)	≤150	194	200	124	-----	-----	95	-----	-----
	Determinação da Temperatura de Amolecimento (°C)	≥ 43	47	47.2	47	-----	-----	48	-----	-----
Tamanho Médio das Partículas de Betume (µm)		-----	16.6	18.5	17.4	7.3	19	11.1	12.7	10.5

Tabela 4. Valores obtidos nos ensaios realizados às emulsões betuminosas produzidas com betume base da refinaria de Sines

Propriedades		Valores	Refinaria de Sines							
			Sem Promotor de Adesão				Com Promotor de Adesão			
			Aditivo M		Aditivo J		Aditivo M		Aditivo J	
		X %	Y %	X %	Y %	X %	Y %	X %	Y %	
Denominação das Emulsões		----	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16
Propriedades Perceptíveis		TBR	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Carga das Partículas		Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva
pH da Fase Aquosa		2 - 3	2.41	2.48	2.32	2.39	2.41	2.48	2.32	2.23
pH da Emulsão		3 - 5	3.9	4.22	4.11	2.67	4.16	3.98	2.71	3.01
Temperatura da Emulsão (°C)			25	25.4	20.2	24.1	22.5	22.3	25.1	23.4
Índice de Rotura		120-180	130.9	124.1	72.1	121.2	125.6	-----	120.5	123.7
Teor em Ligante (%)		58-62	59.3	62.9	61.7	61.1	62.2	63.6	60.7	60.6
		≥ 58	---	---	---	---	---	---	---	---
Teor em Fluidificante (%)			0	0	0	0	0	0	0	0
Evaporação Simples (indicativo) (%)			60.8	59.1	59.7	60.7	62	59.3	58.7	58.2
Tempo de Escoamento, 2 mm a 40°C (Viscosidade) (s)		15-45	29	34.5	39	36.5	38	42	39.5	43.5
Resíduo no Peneiro de 0,5 mm (% em massa)		≤0,2	0.023	0.033	0.064	0.006	0.011	0.023	0.033	0.003
Sedimentação (7 dias) (%)		≤10	0.1	4.2	2.4	4.9	0.9	4.4	1.8	2.4
Resíduo de Evaporação [EN 13074]	Penetração do Betume Residual (0.1 mm)	≤150	82	-----	-----	-----	119	81	-----	138
	Determinação da Temperatura de Amolecimento (°C)	≥ 43	48.8	49.4	-----	49.8	46.2	54	-----	40.4
Tamanho Médio das Partículas de Betume (µm)		-----	16.5	16.6	11.4	9.3	18	17.3	7.4	7.1

Observando as tabelas anteriores (Tabela 3 e Tabela 4), é possível fazer uma análise bastante diversificada dos resultados obtidos.

Ao analisar o pH na fase aquosa, todas as emulsões contêm valores entre 2 e 3, uma vez que foi com esse objectivo que se adicionou o ácido clorídrico a esta fase. Observando agora o pH final das emulsões, verifica-se que na maioria dos casos, este valor é superior ao da fase aquosa respectiva, e está compreendido 2.5 e 4.5, o que é favorável, dado que o intervalo indicado está compreendido entre 3 e 5, podendo ainda variar ligeiramente. No entanto, algumas emulsões apresentam valores de pH inferiores ao da sua fase aquosa, e ainda, inferiores a 2.5, pelo que se tornam inutilizáveis, como as E1, E2, E3 e E6. Dado que o betume originário da refinaria de Matosinhos tem um pH mais ácido relativamente ao da refinaria de Sines, era de esperar que emulsões com as mesmas características, diferindo apenas na origem do betume, apresentem pH mais ácido e menos ácido, conforme sejam de Matosinhos ou Sines. Isto foi precisamente o que sucedeu, excepto com um único tipo de emulsão (E7 e E15). Este facto podia dever-se, por exemplo, a uma variação entre o pH das fases aquosas das duas emulsões. No entanto não é o caso, já que estes são muito semelhantes. Ainda assim, a diferença não é muito significativa.

O valor do índice de rotura para emulsões apropriadas para microaglomerados deve estar compreendido entre 120 e 180. É então possível concluir que a maioria das emulsões produzidas está de acordo com o intervalo normalizado. Existem no entanto, algumas que se encontram bastante afastadas deste intervalo, e outras ainda próximas pelo que estas últimas podem ser utilizadas, como é o caso das E2, E5 e E6. As emulsões E7 e E11 ficam excluídas.

O teor em ligante deve estar compreendido entre 58% e 62% dado que se trata de uma emulsão betuminosa do tipo C60B5. Este não é cumprido para as emulsões E2, E4, E5, E6, E10, E13 e E14. Não obstante, as emulsões E10 e E13 não estão significativamente afastadas deste intervalo de valores, logo podem ainda ser consideradas, eliminando-se as restantes.

A viscosidade das emulsões é dada pelo tempo de escoamento, que deve estar compreendido entre 15s e 45s. Apenas uma emulsão não respeita a gama de valores normalizada (E5), apresentando um valor superior, o que significa que esta emulsão é demasiado viscosa. Este aspecto pode, por exemplo, provocar uma má adesividade activa, isto é, um envolvimento deficiente entre a emulsão e os agregados. Logo a emulsão é

rejeitada. Este valor pode ter dado superior ao que era esperado, devido à percentagem de betume presente na emulsão, que foi também superior ao que se pretendia (63.5%), e estes dois elementos estão directamente relacionados.

A percentagem de resíduos retida no peneiro 0.500 *mm* deve ser igual ou inferior a 0.2% em massa, valor que é cumprido para todas as emulsões produzidas, excepto para a E2.

A sedimentação das emulsões betuminosas deve resultar num valor de teor em água, igual ou inferior a 10%. Este facto só não sucede para uma emulsão (E8). No entanto, o ensaio foi realizado bastante tempo após a produção da emulsão, dado que não foi possível realizá-lo em tempo útil. Por este motivo, a emulsão não foi rejeitada. É de salientar que o valor de teor em água da emulsão E1 deu negativo, o que significa que os glóbulos de betume não apresentam tendência à deposição no fundo do recipiente da emulsão, mas sim à migração para a superfície.

Analisando os valores de penetração e temperatura de amolecimento do resíduo de evaporação das emulsões, a E1 e E2 não cumprem os requisitos para o primeiro ensaio, enquanto que para o segundo, apenas a E16 não está de acordo.

Existem algumas emulsões cujos ensaios não foram todos realizados. É por este motivo que na Tabela 3 e Tabela 4 estão em falta alguns valores. Isto deve-se ao facto de não haver quantidade de emulsão suficiente para a realização dos mesmos.

Por fim, mas não menos importante, muito pelo contrário, encontra-se o tamanho médio das partículas de betume presentes nas emulsões. Todas elas foram analisadas ao microscópio (Figura 23), e foi determinada uma média para o tamanho dos glóbulos de betume, depois de se realizar 30 medições para cada emulsão. Analisando então os valores obtidos, existe uma gama um pouco elevada de valores, nomeadamente entre 7.1 μ m e 19 μ m. Dado que não existe um intervalo de valores que seja obrigatório respeitar, e sim, valores indicativos, não se pode excluir nenhuma emulsão devido somente ao seu tamanho médio de partículas. No entanto, dado que este possui uma elevada importância no comportamento das emulsões, como foi já exposto, deve-se optar por emulsões que apresentem os valores inferiores. Sendo assim, e tendo em conta apenas este parâmetro, era de excluir as emulsões E2, E3, E5, E13 e E14.



Figura 23. Microscópio

Com as emulsões que restaram (E8, E9, E12 e E15), e observando as características de todas no geral escolheram-se duas delas, com preferência a uma com betume originário da refinaria de Matosinhos e a outra com betume da refinaria de Sines. Optou-se então pelas emulsões E8 e E12:

- E8 – Emulsão produzida com betume base da refinaria de Matosinhos, com ‘y’ percentagem de Aditivo J (0.5% – 0.8%), e com promotor de adesão;
- E12 – Emulsões produzida com betume base da refinaria de Sines, com ‘y’ percentagem de Aditivo J (0.5% – 0.8%), e sem promotor de adesão.

Na Figura 24 apresentam-se as referidas emulsões aquando da sua produção, e na Figura 25 encontram-se as respectivas imagens ao microscópio dos glóbulos de betume rodeados pelo emulsionante, tal como era de esperar. A emulsão E8 apresenta partículas de betume com $10.5 \mu m$ em média, e na emulsão E12 existem partículas com diâmetro médio de $9.3 \mu m$, como se pode observar também nas tabelas onde são apresentados os resultados dos ensaios (Tabela 3 e Tabela 4).

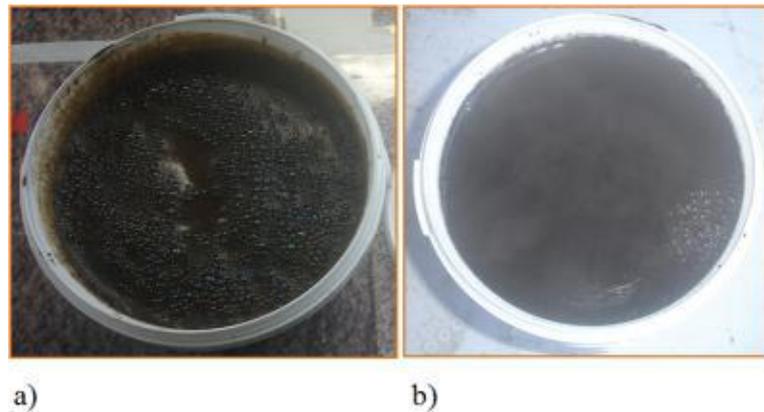


Figura 24. Emulsões betuminosas: a) E8 – produzida com betume base da refinaria de Matosinhos, com y % de Aditivo J, e com promotor de adesão; b) E12 – produzida com betume base da refinaria de Sines, com y % de Aditivo J, e sem promotor de adesão

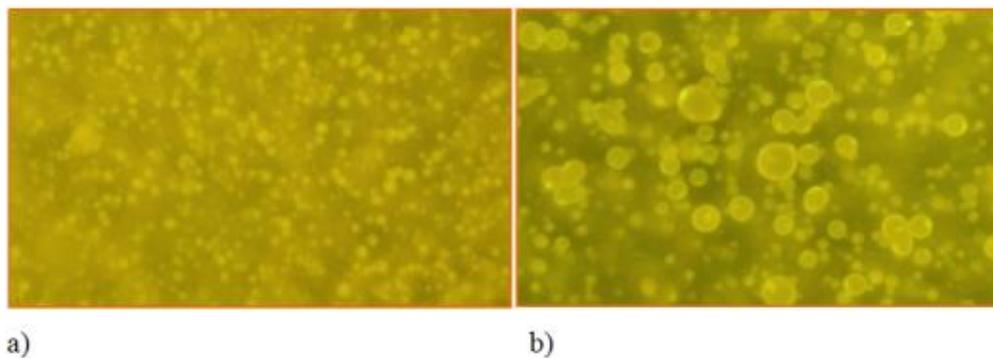


Figura 25. Imagem das emulsões vista ao microscópio, ambas com ampliação de 40x: a) E8 – produzida com betume base da refinaria de Matosinhos, com y % de Aditivo J, e com promotor de adesão; b) E12 – produzida com betume base da refinaria de Sines, com y % de Aditivo J, e sem promotor de adesão

Observando a Tabela 3 e a Tabela 4, existe ainda uma grande quantidade de dados que pode ser analisada, como por exemplo, verificar como variam determinados parâmetros quando algum em específico é alterado. Seguem-se todas as interpretações efectuadas, tendo em conta as imagens respectivas, que se encontram em anexo.

- Percentagem de betume residual VS viscosidade

Estes dois parâmetros relacionam-se através de uma proporcionalidade directa, como foi já referido. Observando os valores obtidos nas tabelas de resultados (Tabela 3 e Tabela

4), foi possível construir dois gráficos (Figura 26 e Figura 27). Conclui-se então, que para o conjunto de emulsões E1 e E2, E3 e E4, E9 e E10, E11 e E12, esta relação é claramente verificada. Todas estas emulsões não contêm promotor de adesão na sua constituição (Figura 26). No gráfico destinado às emulsões com promotor de adesão (Figura 27), a mesma relação é verificada, mas apenas para o conjunto de emulsões E13 e E14. Observando os mesmos gráficos, é ainda possível observar a relação entre a viscosidade e a percentagem de emulsionante. Esta é directamente proporcional, tal como esperado, para todas as emulsões, com excepção dos conjuntos E5 e E6, E11 e E12. No entanto, construíram-se também 2 gráficos para efectuar a comparação entre estes dois parâmetros.

- Viscosidade VS tamanho médio das partículas de betume

Quanto menor for o tamanho médio das partículas de betume, e quanto menor for o desvio a essa média, melhor (e maior) será a viscosidade da emulsão. Esta relação é verificada para a maioria dos casos, excepto para o conjunto de emulsões E2 e E10, E5 e E13, E6 e E14 (Figura 28 e Figura 29).

- Viscosidade VS sedimentação

Equiparando as emulsões com betume de Matosinhos e de Sines (Figura 30 e Figura 31), a maioria respeita a relação inversa entre a viscosidade e a sedimentação. No entanto o conjunto de emulsões E6 e E14 não estão de acordo com esta relação. Os pares E5/E13 e E7/E15 não são passíveis de comparações dado que não se realizaram os ensaios de sedimentação para as emulsões E5 e E7. Por fim, as emulsões E8 e E16 estão de acordo com o que era esperado, no entanto, o valor da sedimentação da emulsão E8 não foi tido em consideração (deu um valor fora do intervalo normalizado, mas ignorou-se esse facto devido à realização tardia do ensaio) pelo que não se deve ter em conta a comparação dos parâmetros em causa nestas duas emulsões.

- Viscosidade VS percentagem de emulsionante

Estes parâmetros são directamente proporcionais. No entanto, nas emulsões E5 e E6, estas variações não estão de acordo com o esperado, assim como as emulsões E11 e E12. Ainda assim, as restantes emulsões seguem a variação padrão (Figura 32 e Figura 33).

- Índice de rotura VS Percentagem de emulsionante

Dado que um aumento da quantidade de emulsionante (até certo ponto), aumenta a viscosidade da emulsão, a sedimentação vai diminuir, pelo que o índice de rotura aumenta, isto é, a emulsão vai demorar mais tempo a romper. Logo, estes dois parâmetros são directamente proporcionais. Procedendo a uma análise dos resultados obtidos (Figura 34 e Figura 35), verifica-se que para um aumento da percentagem de emulsionante, efectivamente o valor do índice de rotura sofre um incremento. No entanto, este facto apenas se verifica nas emulsões que têm incorporadas o Aditivo J como emulsionante. Todas as restantes (em que o emulsionante é o Aditivo M) verifica-se uma proporcionalidade inversa dos dois parâmetros em causa. É de salientar, que não foi possível comparar os resultados das emulsões E13 e E14, dado que não se pôde realizar o ensaio à rotura da E14.

- Tamanho médio das partículas de betume VS índice de rotura

Tal como a relação dos dois parâmetros anteriores, o tamanho médio dos glóbulos de betume e o índice de rotura relacionam-se de forma semelhante, uma vez que quanto menor forem as partículas, mais estável se torna a emulsão, levando mais tempo a romper (proporcionalidade inversa). Este facto verifica-se para todas as emulsões que contêm o Aditivo J na sua constituição. No entanto, para as emulsões E5 e E6, que foram produzidas com o Aditivo M, não se verifica a mesma relação (não se tratando de uma variação muito significativa). Relativamente às emulsões E13 e E14, não é possível efectuar a sua comparação (Figura 36 e Figura 37).

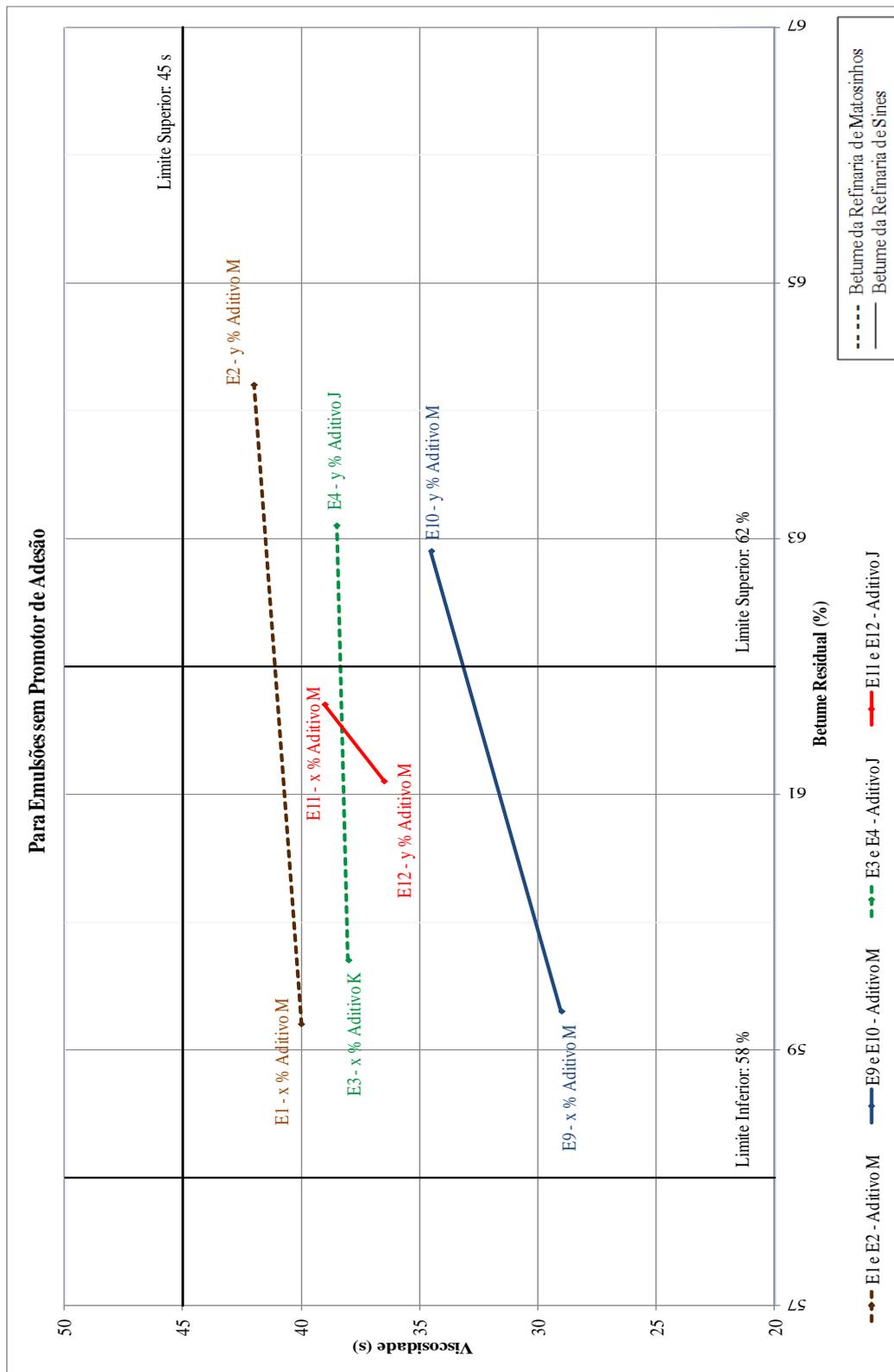


Figura 26. Valores de betume residual VS viscosidade, para emulsões sem promotor de adesão

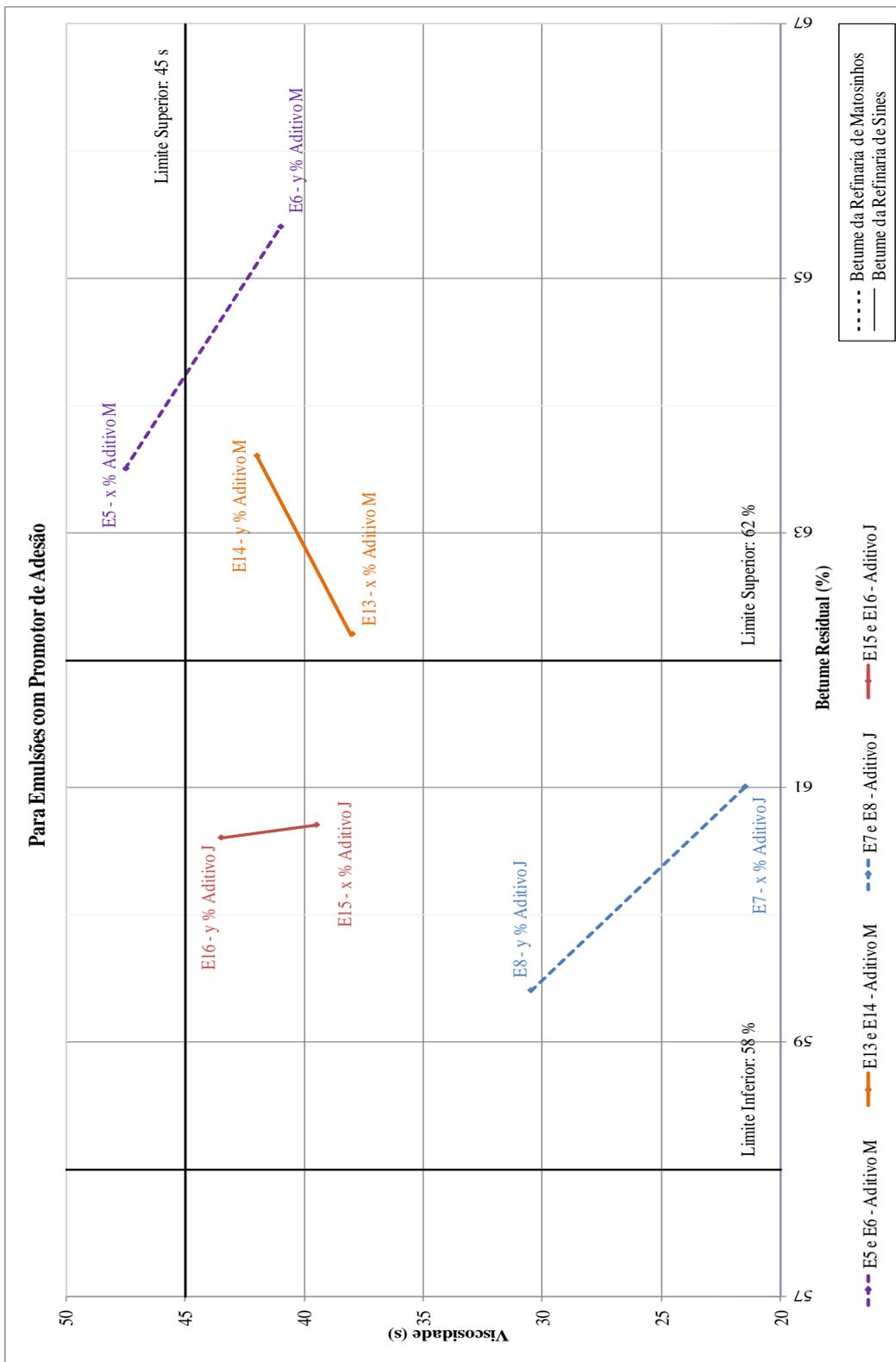


Figura 27. Valores de betume residual VS viscosidade, para emulsões com promotor de adesão

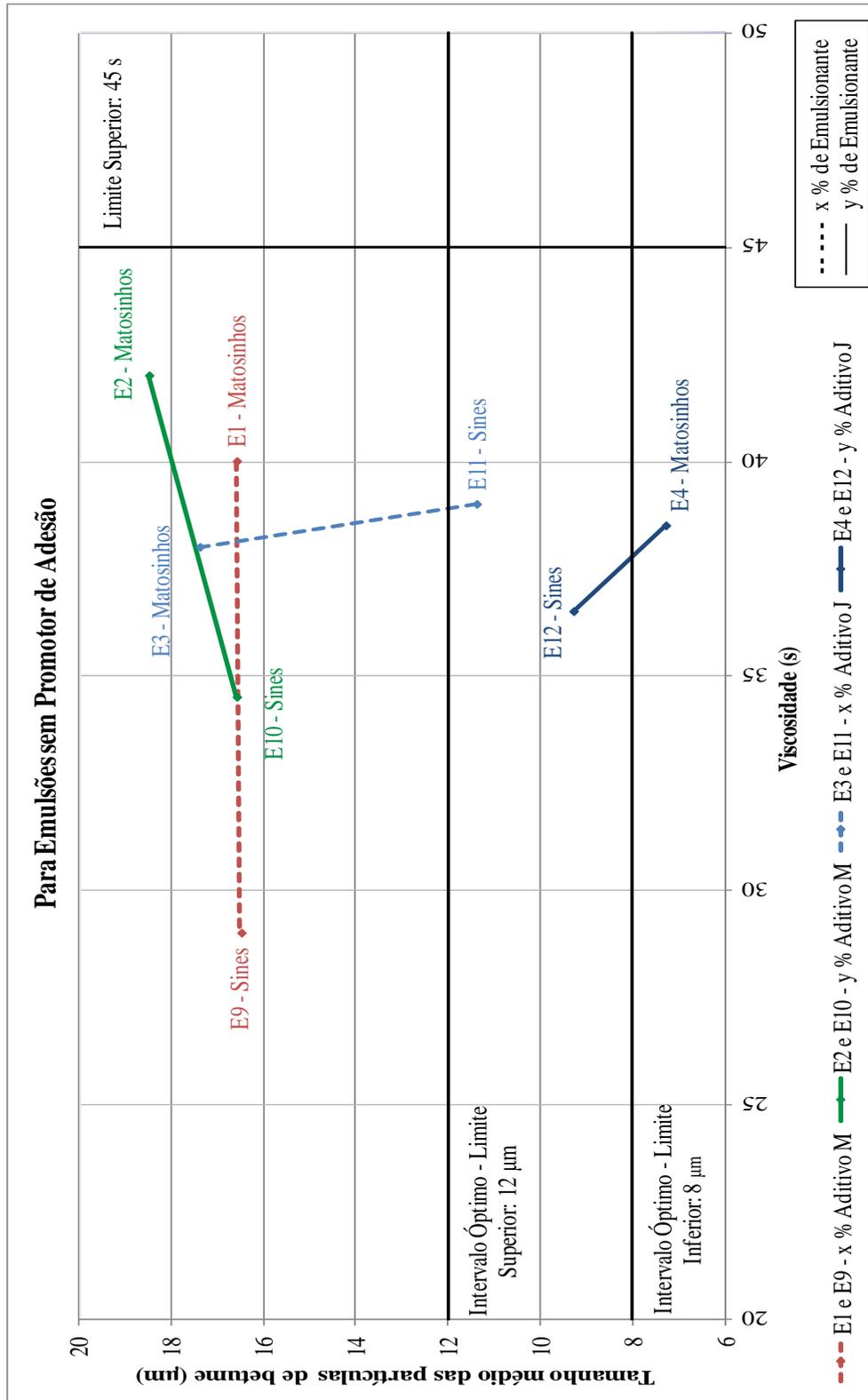


Figura 28. Valores de viscosidade VS tamanho médio das partículas de betume, para emulsões sem promotor de adesão

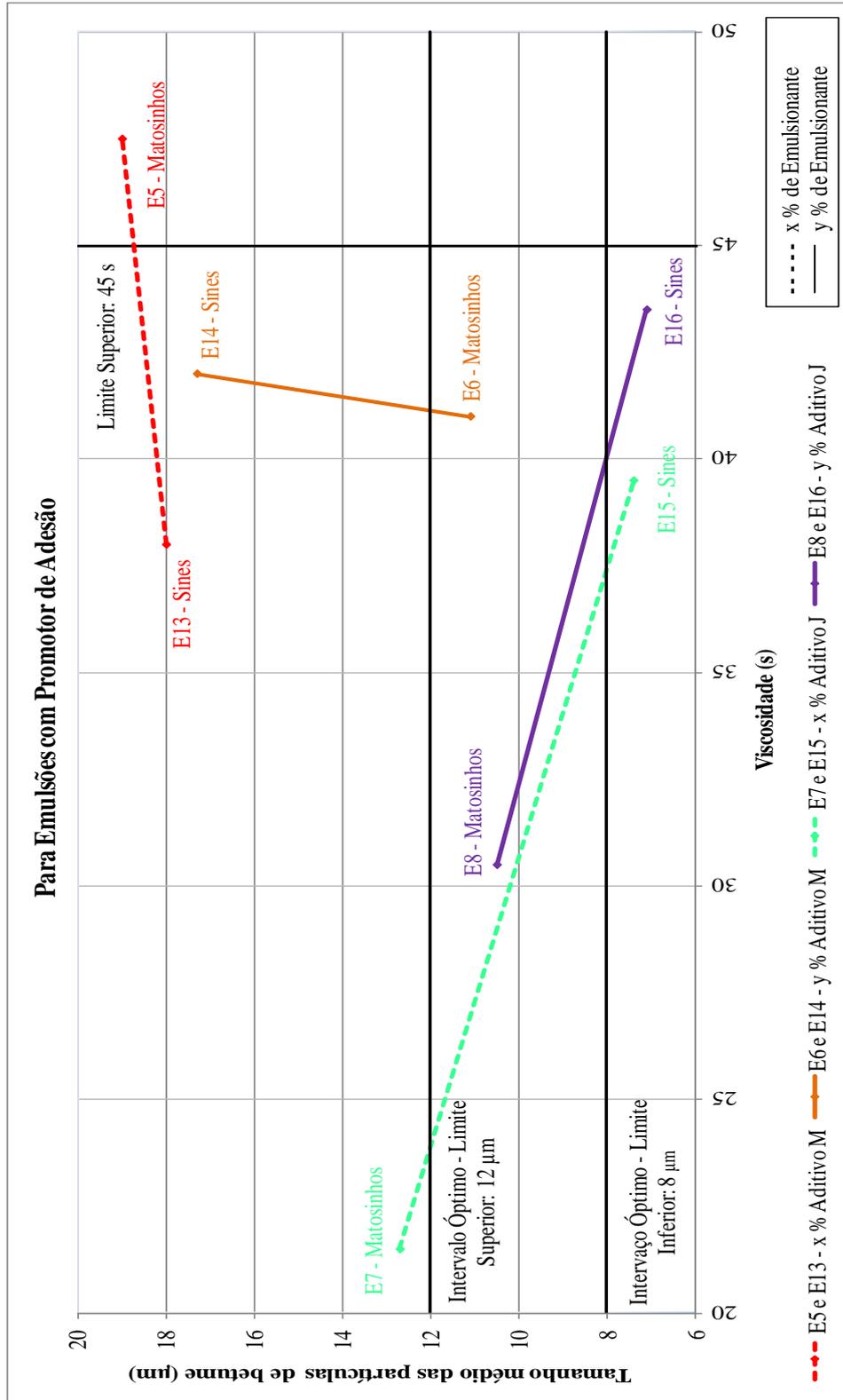


Figura 29. Valores de viscosidade VS tamanho médio das partículas de betume, para emulsões com promotor de adesão

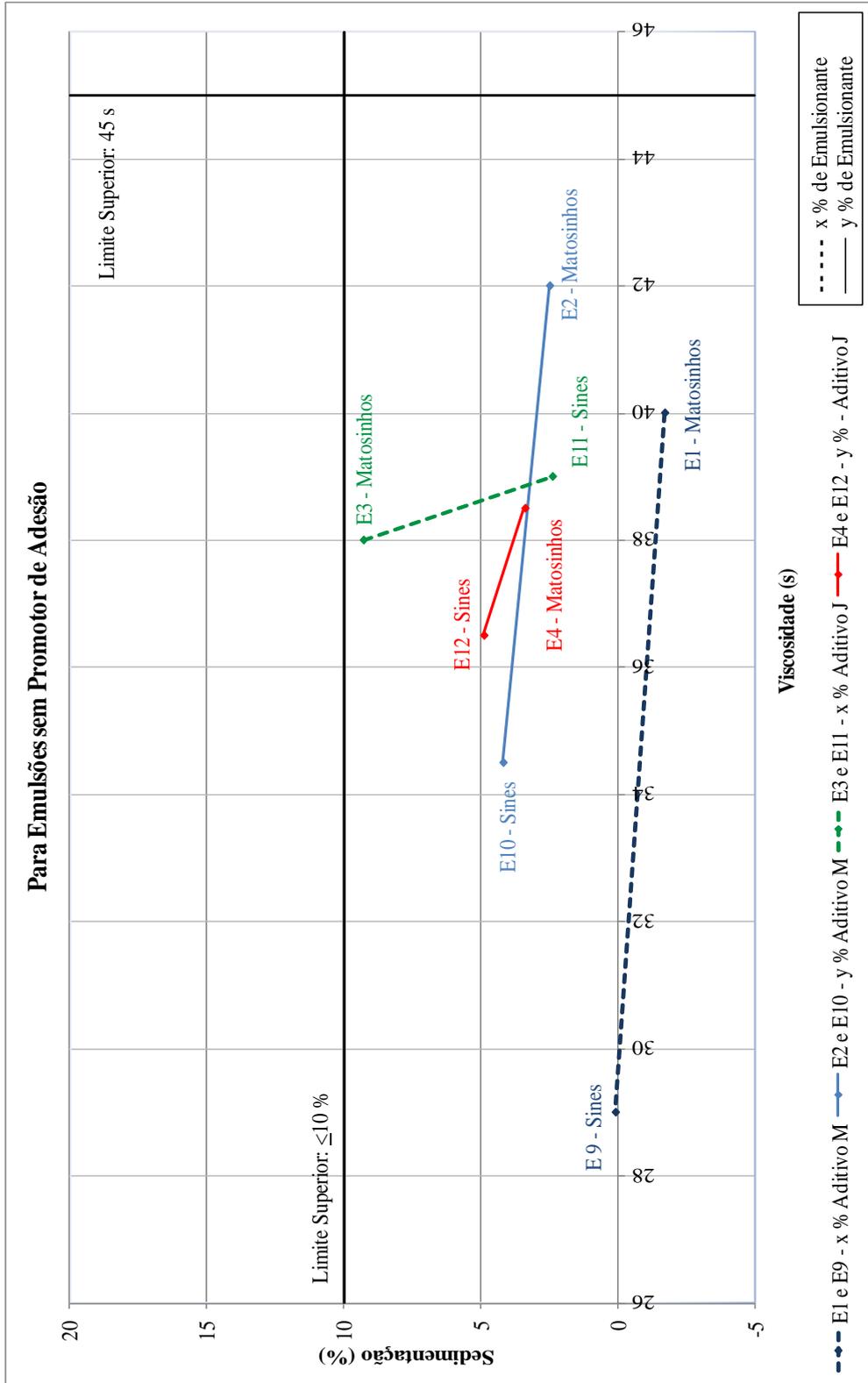


Figura 30. Valores de viscosidade VS sedimentação, para emulsões sem promotor de adesão

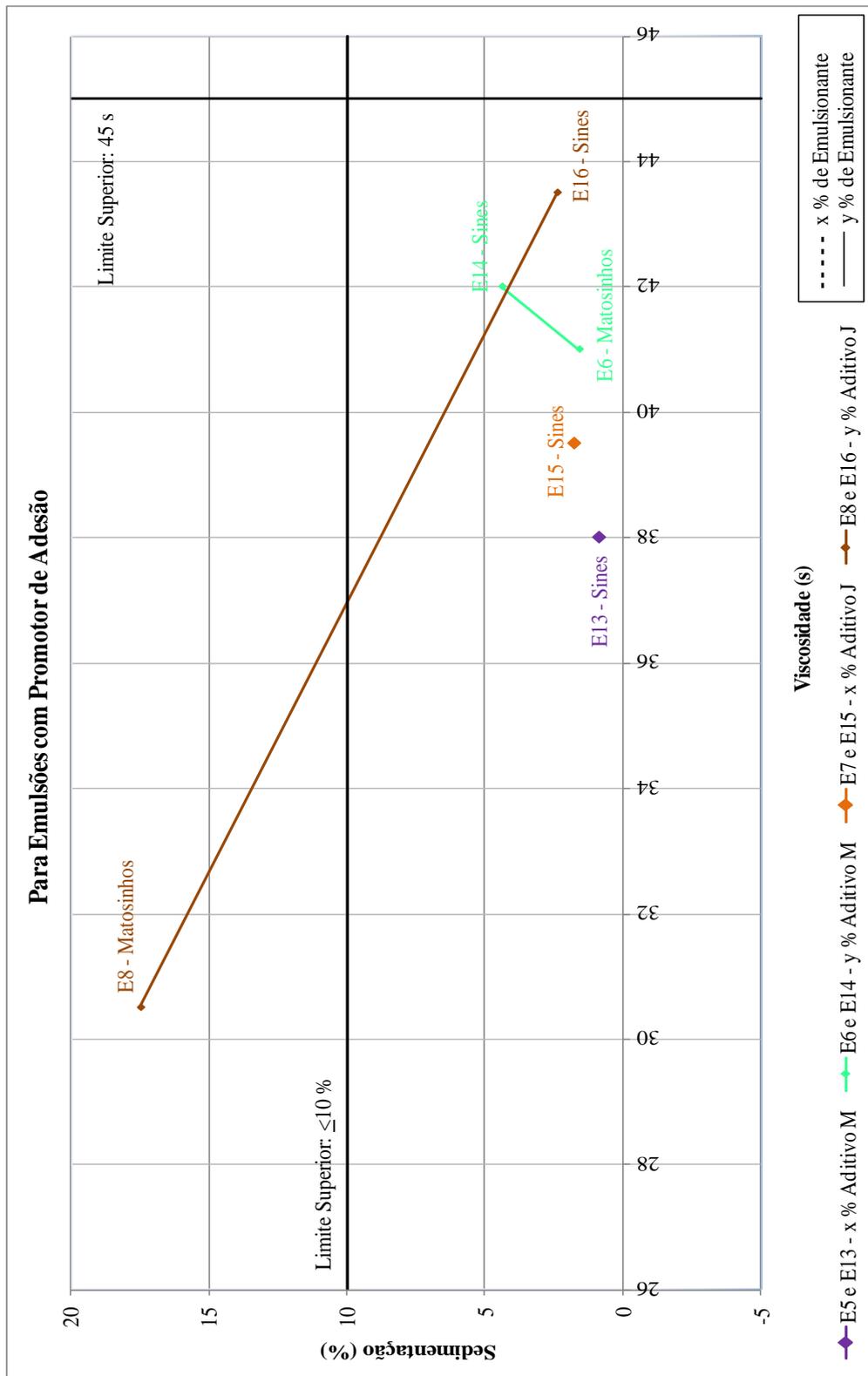


Figura 31. Valores de viscosidade VS sedimentação, para emulsões com promotor de adesão

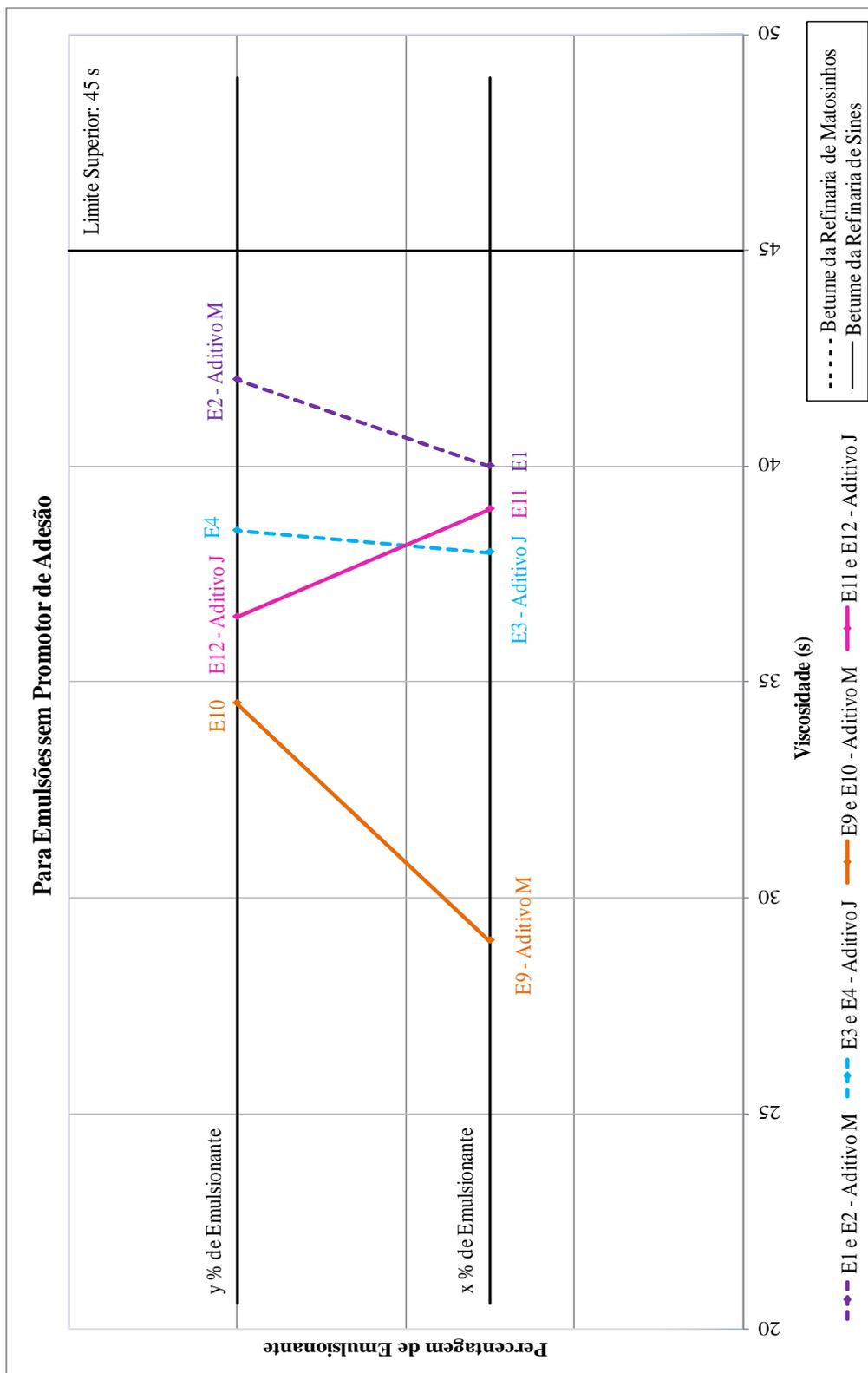


Figura 32. Valores de viscosidade VS percentagem de emulsionante, para emulsões sem promotor de adesão

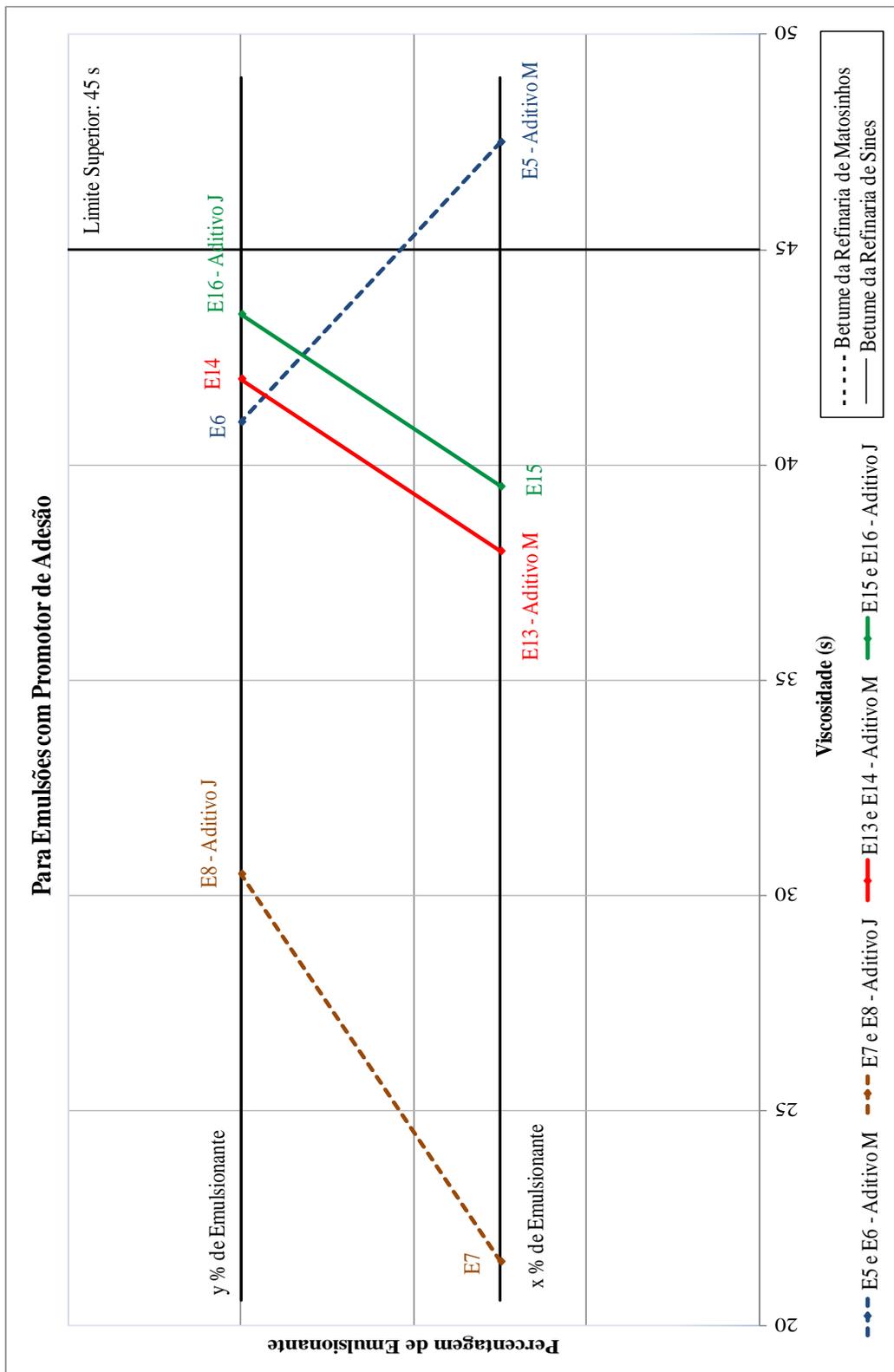


Figura 33. Valores de viscosidade VS percentagem de emulsionante, para emulsões com promotor de adesão

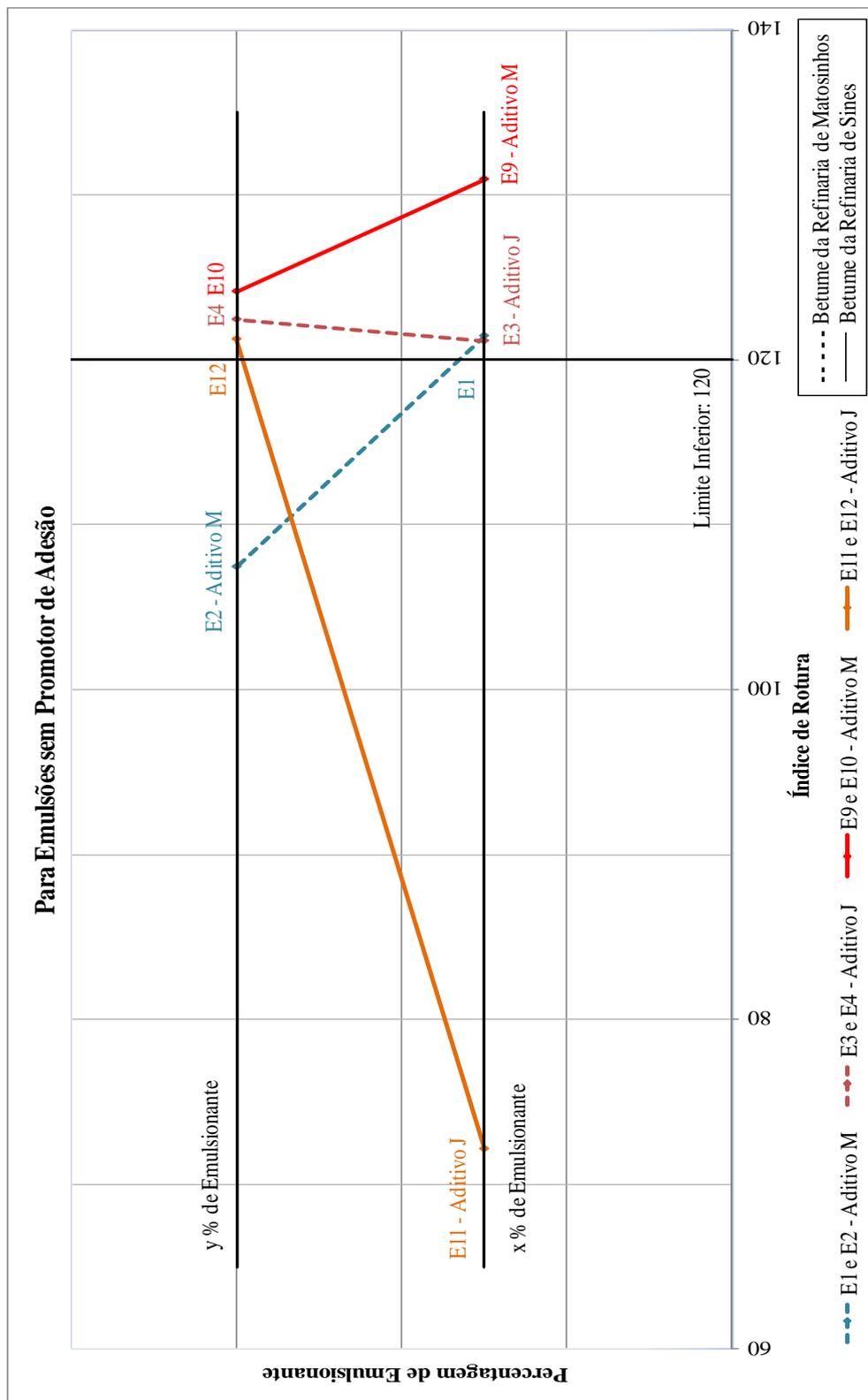


Figura 34. Valores de índice de rotura VS percentagem de emulsionante, para emulsões sem promotor de adesão

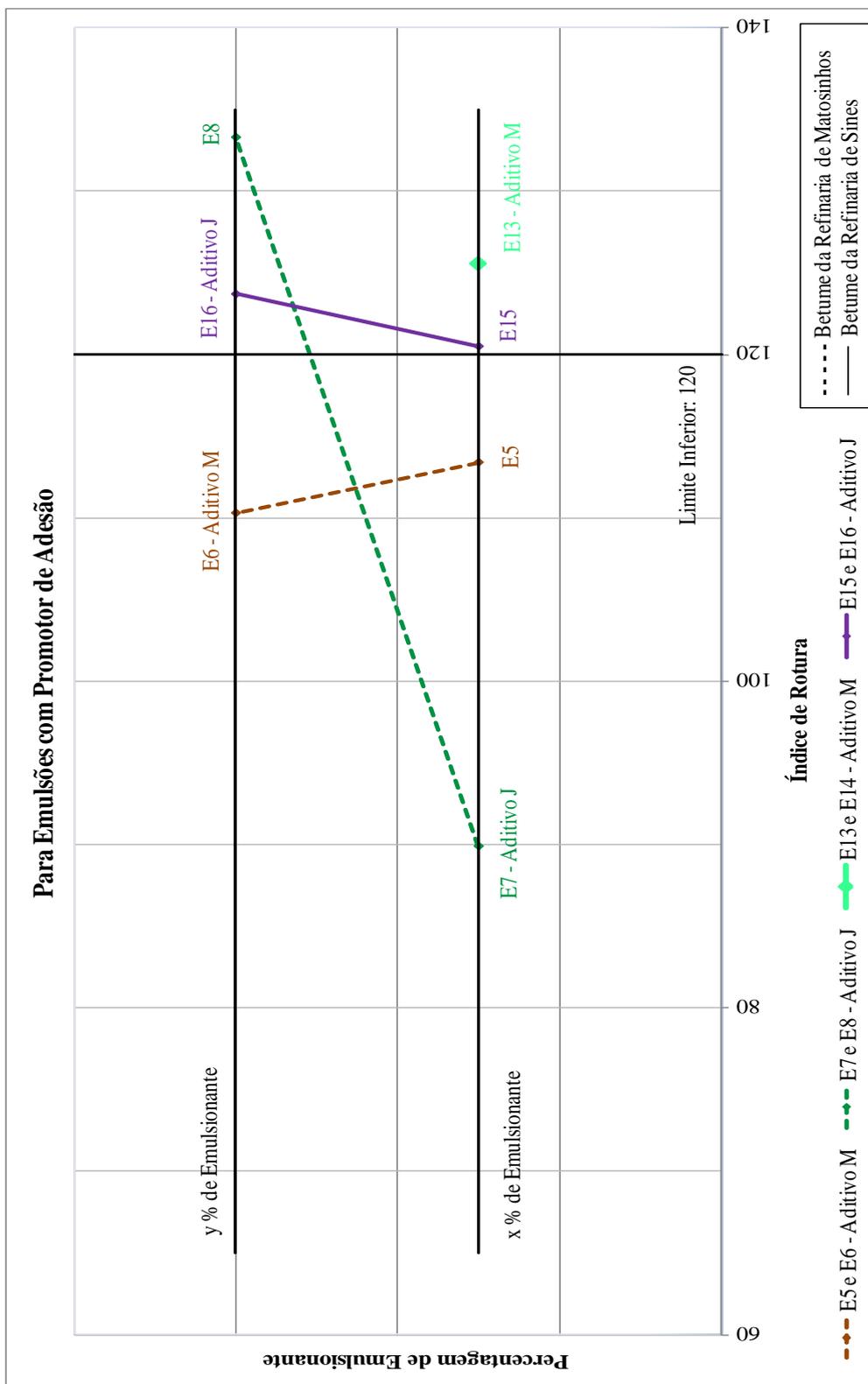


Figura 35. Valores de índice de rotura VS percentagem de emulsionante, para emulsões com promotor de adesão

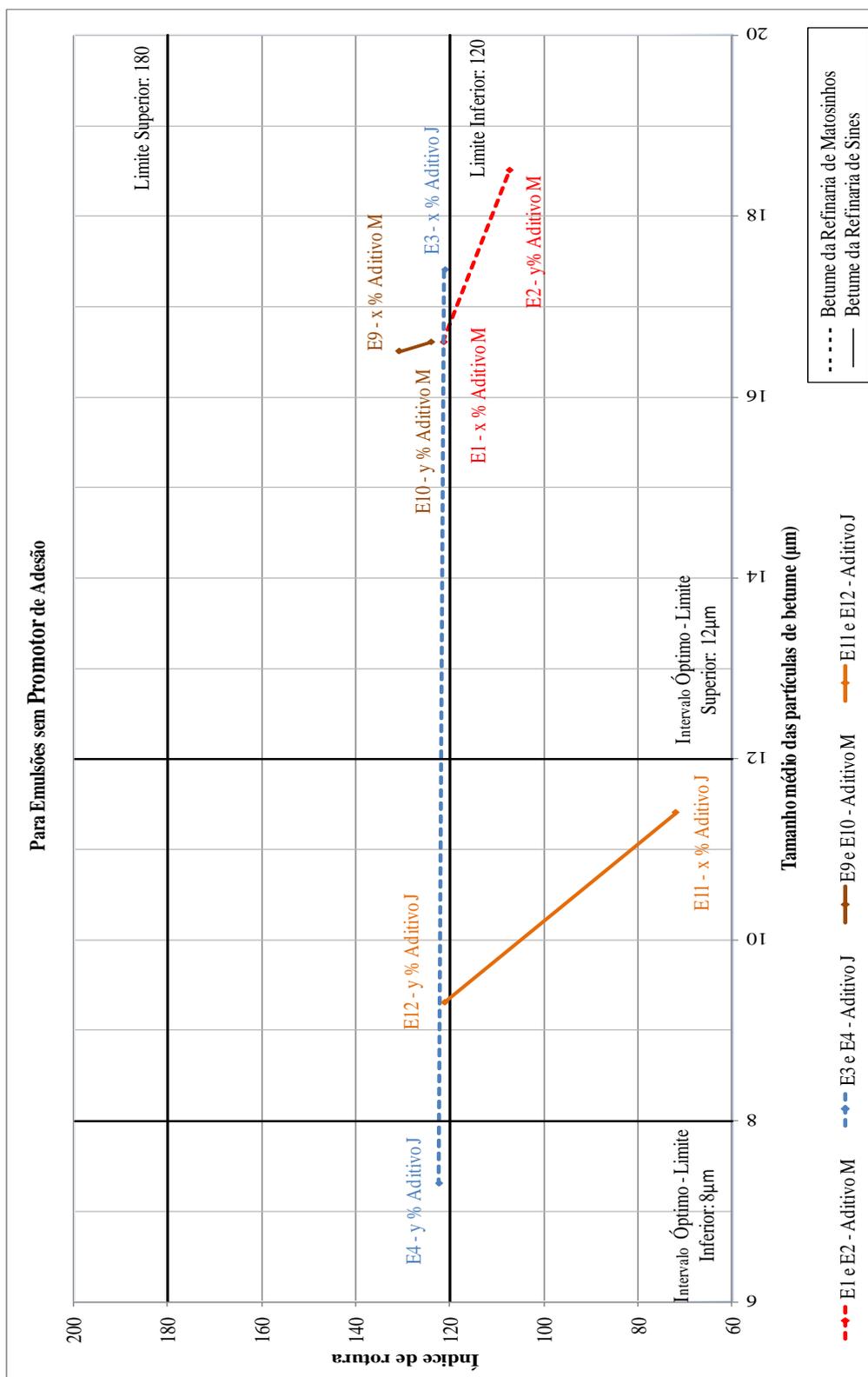


Figura 36. Valores de tamanho médio das partículas de betume VS índice de rotura, para emulsões sem promotor de adesão

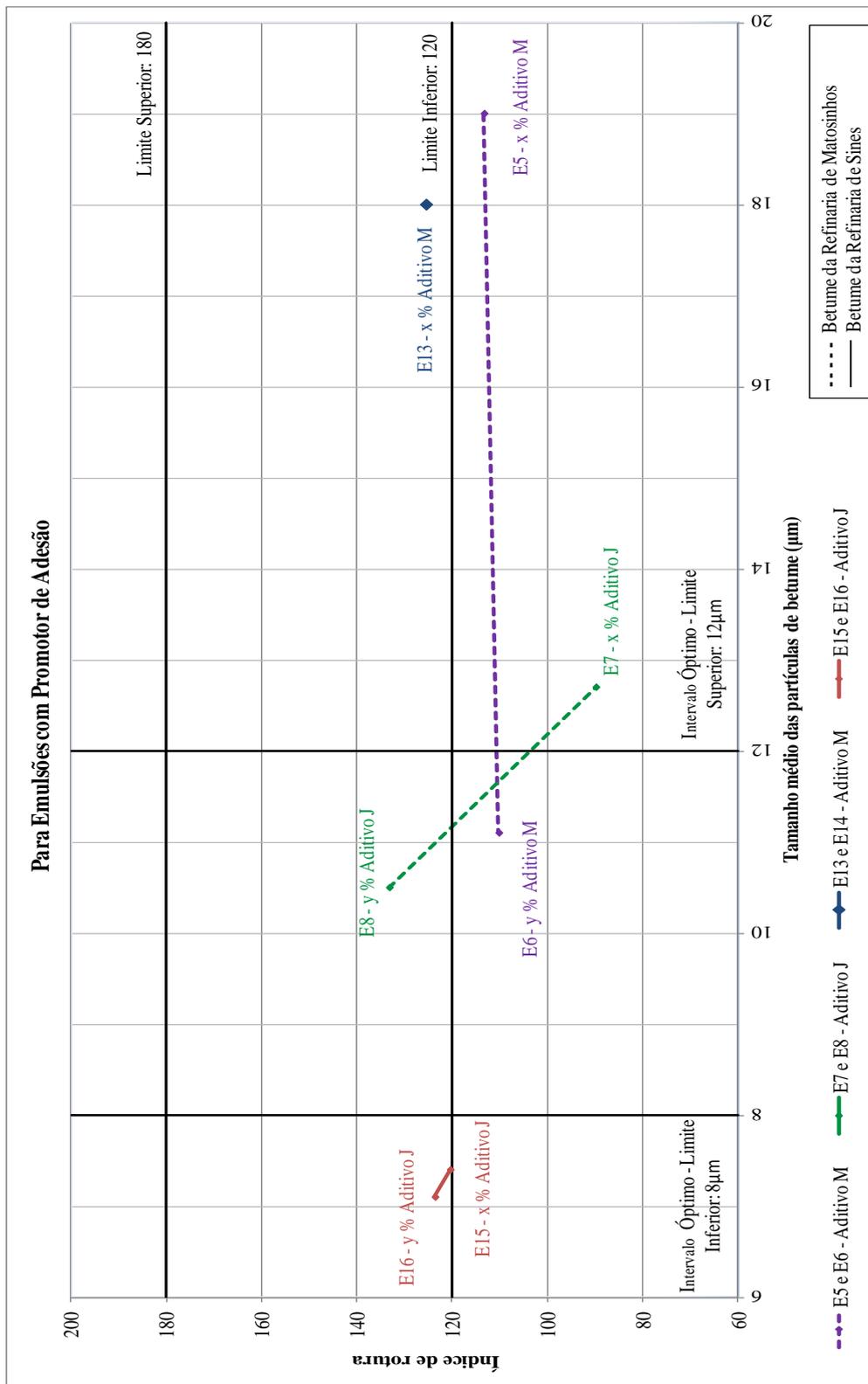


Figura 37. Valores de tamanho médio das partículas de betume VS índice de rotura, para emulsões com promotor de adesão

4.4.Principais conclusões da formulação das emulsões

Tendo em conta todos os parâmetros avaliados acima, é possível concluir que o Aditivo J detém um comportamento preferível, em detrimento do Aditivo M, dado que as emulsões que são produzidas com o primeiro apresentam melhores resultados tanto nos ensaios, como nas variações relativas entre eles. Foi também este um dos critérios utilizados para a escolha das duas emulsões com as características mais favoráveis (já indicadas atrás), e que teoricamente dariam origem a microaglomerados com melhor desempenho.

Seguidamente, é apresentado um capítulo com as noções gerais de microaglomerados betuminosos a frio, e sua produção.

5. MICROAGLOMERADO BETUMINOSO A FRIO

O microaglomerado tem a sua origem nos anos 20. No entanto, não foi imediatamente designado com o nome actual, nem possuía ainda as características de que goza hoje em dia. Este surgiu como evolução de diversas técnicas de revestimentos superficiais. No ano de 1928 na Alemanha, surgiu uma técnica chamada Schlamm. Esta técnica baseava-se em envolver areia molhada em betume do tipo 80/100 a uma temperatura de 145°C, processo de difícil execução dado a temperatura demasiado reduzida do betume. No entanto, este método deixou de ser usado quando surgiram as emulsões de rotura lenta. As primeiras a surgirem e a serem utilizadas foram emulsões aniónicas. Com elas era possível produzir um tipo de slurry, que tal como o Schlamm, podia ser armazenado em tambores e aplicado de forma semelhante. No entanto, o tempo de rotura estava condicionado pelas condições atmosféricas. A partir de 1963 surgiu um outro método, denominado Slurry Seal, que se distinguiu do anterior pelo tipo de emulsão que o constituía: emulsão catiónica. Este tipo de emulsões permitia o controlo do tempo de rotura da mistura, facilitando a sua aplicação em qualquer local, independentemente do seu clima. Este controlo permitia também a reabertura das vias ao tráfego num espaço de tempo bastante reduzido. Todas estas técnicas foram utilizadas apenas com o objectivo de selar fendas existentes nos pavimentos. No entanto, nenhuma apresentava um amplo período de vida, nem garantia uma suficiente rugosidade ao pavimento. Foi então que, em 1978 na Alemanha surgiu o Microaglomerado. Por sua vez, o microaglomerado garantia rugosidade ao pavimento, selando também as fendas existentes, tal como os métodos seus antecessores. Este começou então, a ser utilizado como forma de manutenção de pavimentos, nomeadamente em França (RF, 2008; Insumos Viales S.A., 2011-b).

A partir desta evolução, passaram a existir ambos os revestimentos superficiais (o Slurry seal e o Microaglomerado), que diferiam principalmente na espessura da camada a aplicar, e no tipo de modificação a que são sujeitos. Estes dois métodos constituíram o chamado Slurry Superficial, cujas exigências se encontram especificadas na norma EN 12273 (CEN, 2008). Como foi já referido, ambos actuam apenas à superfície no pavimento, pelo que não interferem na sua resistência estrutural (Insumos Viales S.A., 2011-b).

Abordando um pouco mais o Slurry Seal, trata-se de uma mistura composta essencialmente por agregados de origem mineral, uma emulsão betuminosa, filler, aditivos e água, sendo a água adicionada com o único objectivo de atribuir trabalhabilidade à mistura. Os agregados devem ser britados e podem apresentar diversos tamanhos, consoante a necessidade, mas não devem exceder os 4 mm. A emulsão betuminosa tem a função de unir os agregados entre si e ao pavimento onde a mistura vai ser colocada. É geralmente de rotura lenta, sobretudo no caso de selagem de fissuras, para que a mistura penetre as fissuras. No entanto, a velocidade de rotura da emulsão, deve ser adequada ao tipo de agregados escolhido, ao tipo de aplicação a que vai ser sujeita, e ainda ao equipamento de espalhamento utilizado. O filler é utilizado com o objectivo de estabilizar ou modificar quimicamente a mistura (Vicente, 2006; RF, 2008; ISSA, 2011-a).

Segundo Insumos Viales S.A. (2011-b), as camadas a aplicar devem apresentar uma espessura compreendida entre 3 mm e 6 mm. Já França (2008), afirma que a espessura das camadas não deve ser superior a uma vez e meia a dimensão do maior agregado.

A lama asfáltica é um método de rápida aplicação, tornando-se vantajoso. Ainda assim, contém uma micro-rugosidade insuficiente (a razão pela qual a sua utilização foi diminuindo, tendo dado origem à pesquisa de um método que satisfizesse este requisito, culminando no microaglomerado, tal como foi referido acima, no presente capítulo), o que leva a uma baixa aderência entre o pneu e o pavimento, sobretudo se este se encontrar molhado (Vicente, 2006). A micro-rugosidade e a macro-rugosidade são factores que determinam a textura de um pavimento, concedendo-lhe maior ou menor aderência. A micro-rugosidade advém da sua micro-textura (pode ser áspera ou polida) que depende das forças moleculares de adesão. Já a macro-rugosidade resulta da macro-textura (pode ser grossa ou fina) do pavimento, isto é, as forças de aderência relativas ao formato geométrico da textura do pavimento (Lopes et al., 2008). Ambas se podem observar na Figura 38.

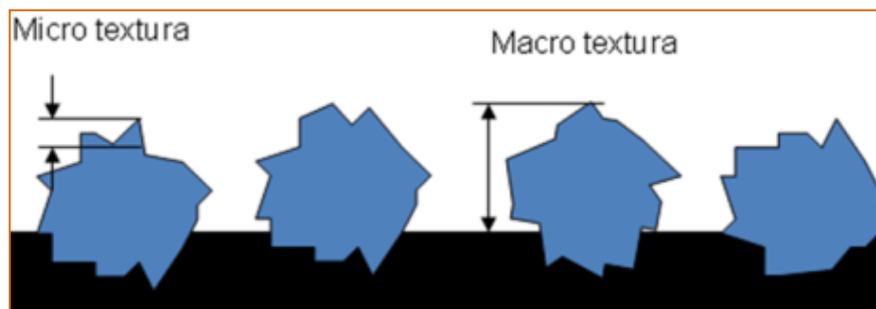


Figura 38. Micro-textura e macro-textura

Esta técnica oferece uma grande facilidade de espalhamento e um grande rendimento obtido, sendo estas as suas principais vantagens. No entanto, não deixou de ser utilizada e, tal como no início do seu aparecimento, é normalmente aplicada na manutenção de pavimentos, impermeabilizando-os e garantindo a sua funcionalidade. Em alguns casos é ainda utilizada como forma de adiar uma reabilitação do pavimento, dado que se trata de uma mistura bastante fluida, indicada para a selagem das fendas nele existentes. É também indicada para aplicações em arruamentos urbanos e vias secundárias (Bernucci et al., 2008; Benta, 2009).

O aparecimento do slurry seal teve como consequência lógica a procura de equipamentos capazes de produzir as misturas e aplicá-las. Estes equipamentos foram também aperfeiçoados ao longo do tempo, e foi nos anos 60 que se conseguiu alcançar máquinas com a capacidade de um doseamento correcto de cada componente da mistura, assim como de uma boa aplicação. Naturalmente, hoje em dia existem máquinas com desempenhos melhorados (RF, 2008). Na Figura 39 apresenta-se um exemplo de aplicação de slurry seal. É de salientar que superfície deve ser limpa antes de proceder à aplicação do revestimento.



Figura 39. Aplicação de Slurry Seal (ISSA, 2011-c)

De um modo geral, estas são as principais características de que goza o Slurry Seal. Na norma A 105 (ISSA, 2005-a) encontram-se especificados todos aspectos relevantes para um bom desempenho deste tipo de slurry superficial.

De seguida, é focado e detalhadamente desenvolvido o Microaglomerado Betuminoso, exclusivamente, uma vez que foi sobre este tipo de Slurry Superficial que se desenvolveu parte do trabalho experimental.

5.1. Propriedades dos Microaglomerados

Tal como para o Slurry Seal, todos os aspectos que determinam um bom desempenho dos Microaglomerados, encontram-se especificados numa norma: a norma A 143 (ISSA, 2005-b).

Ao fazer uma abordagem mais profunda aos microaglomerados betuminosos a frio, será possível observar as diversas vantagens nele presentes. Este actua em várias direcções, melhorando muitas das características dos pavimentos, oferecendo desta forma, conforto e segurança aos utilizadores. De seguida são apresentados aspectos relevantes e vantajosos da utilização deste tipo de revestimento superficial:

- Atribui uma boa rugosidade ao pavimento, induzindo uma superior aderência.
- É alcançada uma boa homogeneidade na distribuição do ligante (Clérigo, 1999-b).
- Impermeabiliza o pavimento, protegendo desta forma as suas camadas inferiores.
- Resolve problemas de aquaplanagem existentes devido à chuva (ISSA, 2011-b).
- Previne a ocorrência de rodeiras, na medida em que impermeabilizando o pavimento, melhora o desempenho das camadas de fundação (Figura 40). Estas distorções ocorrem nas zonas do pavimento por onde circulam as rodas dos veículos, uma vez ser este o meio de transmissão de cargas ao pavimento (RF, 2008; Torrico et al., 2011).



Figura 40. Rodeiras (Mr.Pothole, 2009-a)

- Evita também o chamado “shoving” ou “corrugation” (Figura 41), que são ondulações no pavimento, e que ocorrem em intervalos bastante regulares, nomeadamente inferiores a 3 m. Este tipo de degradação forma-se sobretudo devido ao tráfego pesado e em zonas onde é necessário parar e reiniciar a marcha (Shahin, 2005; Mr.Pothole, 2009-b).

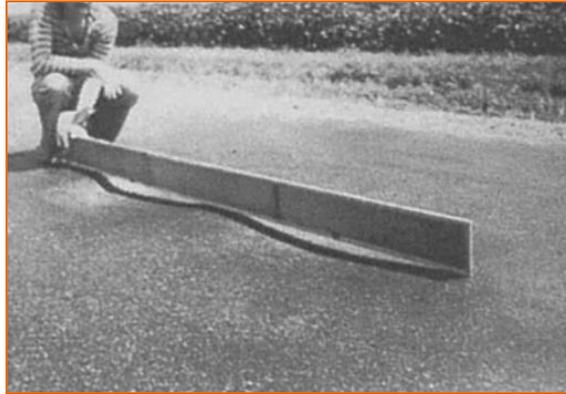


Figura 41. “Shoving” ou “corrugation” (Shahin, 2005)

- Exclui a possibilidade de desprendimento de agregados, factor imprescindível a ter em conta, por exemplo, em pistas de aeroportos, dado que agregados soltos podem provocar danos nos motores dos aviões (ISSA, 2011-b).
- Não precisa de ser compactado, contribuindo desta forma para uma maior rapidez de aplicação (Vicente, 2006).
- Dado que se trata de uma mistura a frio, como foi já referido no segundo capítulo do presente trabalho, os microaglomerados não acarretam elevados gastos energéticos, sendo benéficos para o ambiente, e reduzindo ainda o custo final.
- Possui um elevado rendimento de execução (Clérigo, 1999-b).
- Previne a formação de fendas.
- Pode ser utilizado como protecção e revestimento de bermas (Clérigo, 1999-b).
- Devido a alguns destes aspectos, aumenta o período de vida dos pavimentos onde é aplicado, nomeadamente em sete anos (ISSA, 2011-b).
- Pode renovar pavimentos envelhecidos e desagregados, assim como corrigir pequenas deformações (Clérigo, 1999-b).

Trata-se de uma mistura composta por agregados seleccionados, filer, água, emulsão betuminosa e determinados aditivos. Pode ser aplicado em camadas de 3 a 20 mm (Insumos Viales S.A., 2011-a).

Nas figuras seguintes (Figura 42 e Figura 43) apresentam-se dois exemplos reais da aplicação de microaglomerados:



Figura 42. Microaglomerado (Insumos Viales S.A., 2011-a)



Figura 43. Microaglomerado (OSUSA, 2008)

A sua aplicação pode ser feita em todo o tipo de pavimentos. Sendo assim, apresentam-se alguns exemplos onde é possível implementar microaglomerados (RF, 2008; ISSA, 2011-b):

- Parques de estacionamento;
- Vias sujeitas a tráfego pesado;
- Reparação de zonas comuns a acidentes;
- Zonas urbanas, uma vez que não acarreta um significativo ruído de circulação;

- Auto-estradas;
- Pistas de aeroportos.

No entanto, existem casos em que não é aconselhável a colocação de microaglomerados nos pavimentos, como por exemplo, se o suporte se encontrar em excessivas más condições, isto é, com anomalias superiores a 2 *cm* de profundidade. Neste caso, o tratamento da superfície deve ser realizado com misturas betuminosas a quente. No caso em que as irregularidades estejam compreendidas entre 1 *cm* e 2 *cm*, deve-se colocar uma camada de regularização (de microaglomerado) e só depois, a camada final. Outra situação não recomendável para a aplicação deste revestimento acontece se existirem fendas activas no suporte, dado que ao colocar o microaglomerado por cima, este não vai impedir que as fendas estabilizem (RF, 2008).

Por outro lado, a aplicação dos microaglomerados só deve ser executada a temperaturas superiores a 7°C, dado que existe a possibilidade do microaglomerado congelar antes de ocorrer a rotura da emulsão; e se a humidade do ar se encontrar excessivamente alta, uma vez que irá provocar um aumento no tempo de rotura da emulsão (RF, 2008).

Por fim, é necessário referir que a implementação deste tipo de revestimento superficial não reforça o pavimento estruturalmente; apenas actua à superfície. Acaba, no entanto, por proteger as camadas inferiores, e conseqüentemente a parte estrutural do pavimento. Ainda assim, é necessário garantir a sua segurança estrutural antes da aplicação de qualquer revestimento.

5.2. Constituintes e sua caracterização

Neste ponto, descrevem-se pormenorizadamente todos os componentes necessários ao fabrico de microaglomerados. Realiza-se ainda a sua caracterização, através dos ensaios realizados, nomeadamente aos agregados.

5.2.1. Agregados

Os agregados presentes num microaglomerado betuminoso a frio constituem a maior fatia da mistura. Normalmente são introduzidos numa percentagem compreendida entre 85 e 90%. Este componente interfere substancialmente no comportamento do microaglomerado (RF, 2008). Os agregados podem apresentar dimensões até 12 mm de diâmetro, o que possibilita a escolha de camadas com espessuras mais finas ou mais espessas, podendo optar-se pela colocação de uma ou várias camadas mais finas, ou uma camada mais espessa (Insumos Viales S.A., 2011-b). A razão que leva à opção por aplicar duas camadas, em vez de uma (microaglomerado duplo) é a obtenção de uma maior impermeabilização, macrotextura e ainda uma capacidade de suporte superior (Vicente, 2006).

Em termos de classes granulométricas, de acordo com RF (2008), para a concepção deste tipo de revestimentos, é aconselhada a utilização de agregados 0/4, 0/6 e 0/10. Estas podem ser utilizadas individualmente ou misturadas. Como se verá neste estudo (Figura 45), em Portugal, apenas a utilização da classe granulométrica 0/4, se enquadra no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (E.P., 2009).

Procedeu-se então, a uma análise granulométrica para as referidas classes. É de salientar que os agregados são de origem granítica, visto que são os apropriados para o tipo de emulsão utilizada (catiónica). São também detentores de uma textura rugosa, o que provoca uma boa resistência à deformação, evitando desta forma, as degradações referidas acima, neste capítulo.

Realizou-se ainda um outro ensaio com o objectivo de determinar a massa volúmica e a absorção de água dos agregados em causa.

5.2.1.1. Análise granulométrica

A granulometria dos agregados foi realizada de acordo com a EN 933-1 (ATIC, 2000). Inicialmente procedeu-se à sua lavagem e secagem. Depois de secos, realizou-se a sua peneiração (Figura 44), registando a massa de agregados retida em cada peneiro. Por fim, determinou-se a percentagem de material passado igualmente em cada peneiro. Para as três classes referidas acima, obtiveram-se as percentagens de material passado, indicadas na Tabela 5, assim como o fuso granulométrico respeitante ao microaglomerado

a frio simples, de acordo com as Estradas de Portugal (E.P., 2009). Faz-se também a respectiva representação gráfica das granulometrias usadas (Figura 45):



Figura 44. Peneiração automática e agregados utilizados (classe 0/4)

Tabela 5. Resultados da granulometria de todos os agregados e valores do fuso granulométrico

Abertura dos Peneiros (mm)	Percentagem Passada Acumulada (%)			Limite Inferior do fuso	Limite Superior do fuso
	0/10	0/6	0/4		
12.5	100	100.0	100	100	100
10	99.1	99.3	100	100	100
8	91.6	94.6	100	100	100
5.6	71.2	79.9	95.8	98	100
4	60.7	70.2	88.2	85	99
2	46.6	54.0	63.3	60	85
1	36.3	40.1	45	40	65
0.5	28.2	30.6	32.3	27	45
0.25	20.9	21.6	21.2	15	30
0.125	14.4	14.4	13.6	9	20
0.063	9.4	9.6	8.2	7	15

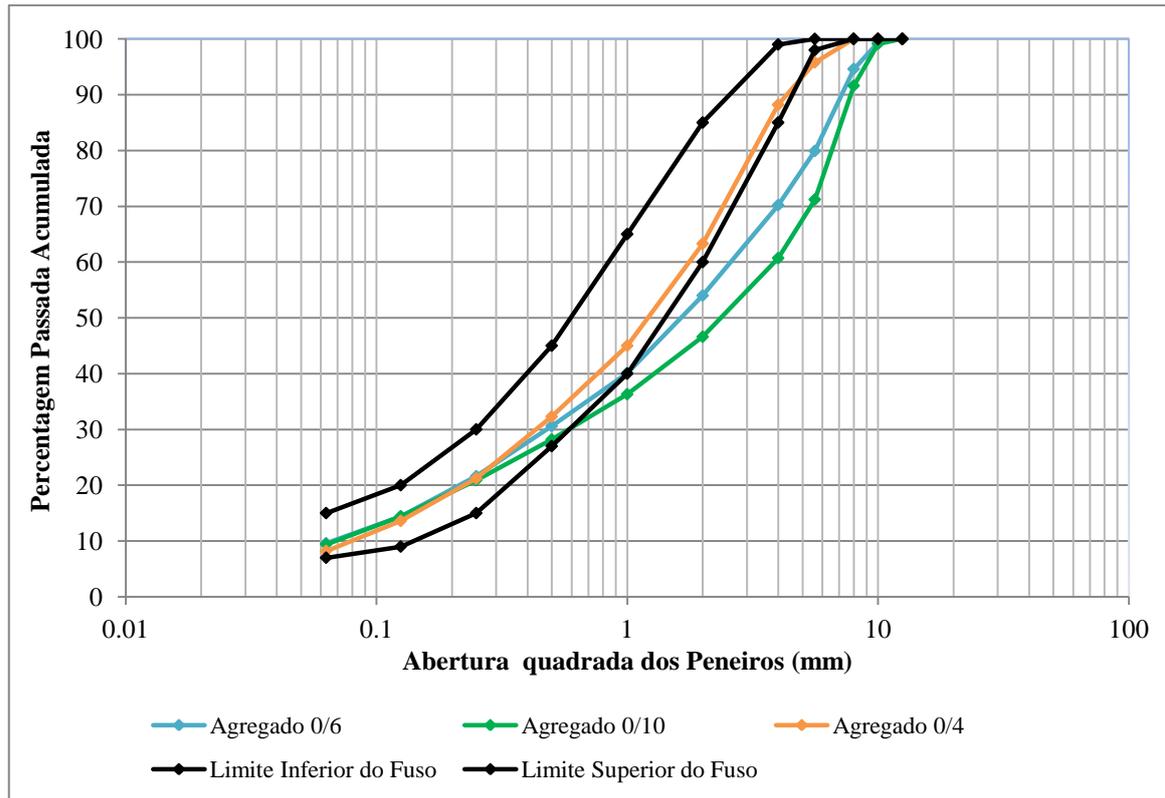


Figura 45. Curvas granulométricas de todos os agregados, e fuso granulométrico a respeitar, segundo C.E.E.P.

Observando gráfico anterior, é possível constatar que existe apenas uma classe granulométrica que se encontra no fuso granulométrico do Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (E.P., 2009). Trata-se do agregado granítico 0/4, pelo que foi este o utilizado para a concepção do microaglomerado.

Não é possível proceder a uma mistura das diversas fracções, visto que para se obter uma curva que respeite o fuso em questão, seriam necessários agregados de dimensões menores à da fracção 0/4, o que não foi possível no presente caso.

De seguida encontra-se representado graficamente a curva granulométrica apenas para a referida classe, juntamente com o respectivo fuso (Figura 46).

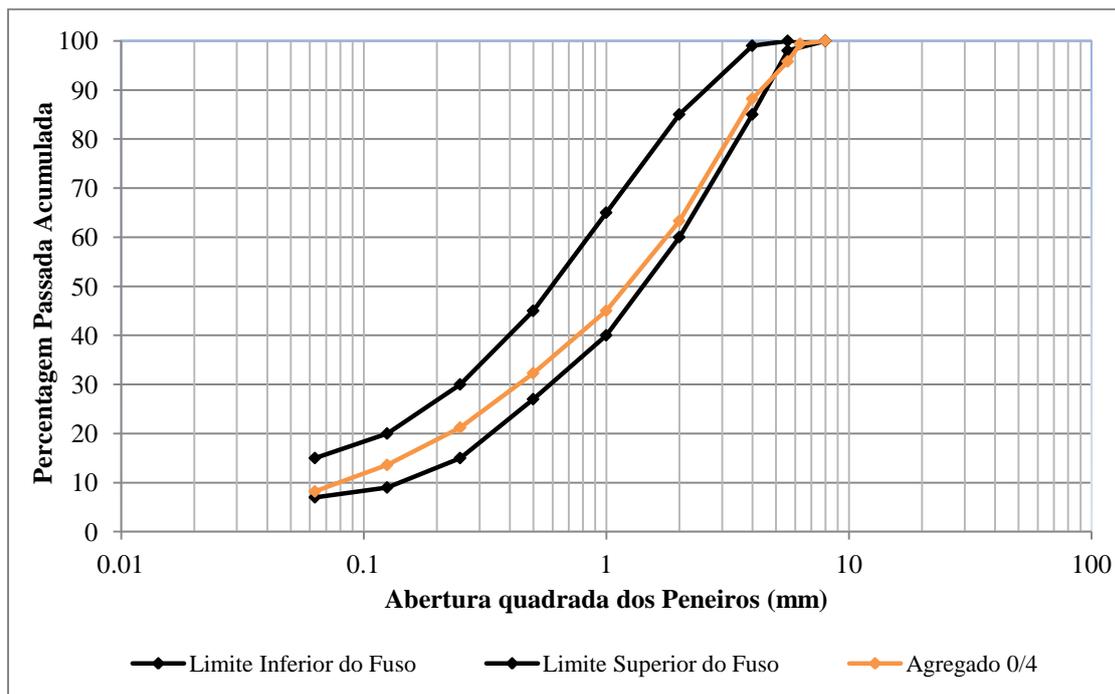


Figura 46. Curva granulométrica do agregado 0/4, e fuso granulométrico a respeitar

5.2.1.2. Massa volúmica e absorção de água

Uma vez que se concluiu que o agregado 0/4 seria o apropriado para a concepção do microaglomerado, o presente ensaio foi realizado somente para este agregado.

Para o cálculo da sua massa volúmica e absorção de água, foi utilizado o método do picnómetro, segundo a norma NP EN 1097-6 (IPQ, 2003). Este método baseia-se na pesagem dos agregados em diversas condições, nomeadamente saturados com a superfície seca, e secos. Inicialmente, estes têm que ser lavados no peneiro de lavagem e de seguida saturados em água durante 24 horas. Posteriormente, inicia-se o processo de secagem até que estes atinjam o estado saturado com superfície seca. A verificação de que este estado foi alcançado, faz-se com a ajuda do molde troncocónico, representado na Figura 47. Coloca-se parte da amostra no molde, alisando-se a sua superfície e aplicando-se suavemente 25 pancadas com o pilão. Por fim retira-se o molde verticalmente, devendo a amostra deformar-se, mas não totalmente, como ilustra a Figura 48. Atingido este estado, coloca-se uma quantidade conhecida de agregado nos picnómetros (foram efectuados dois ensaios de forma a diminuir possíveis erros), colocando de seguida um pouco de água até as amostras ficarem totalmente imersas (Figura 49). Assim permanecem 24 horas.

Posteriormente, enchem-se os picnómetros com água na sua totalidade, fazendo-se o registo das suas massas. Deposita-se de seguida o conteúdo de cada picnómetro (amostra e água) em dois tabuleiros, respectivamente, levando-os à estufa até estes secarem completamente. Por fim, procede-se à pesagem da massa dos agregados secos de cada tabuleiro.



Figura 47. Molde troncocónico e pilão



Figura 48. Deformação da amostra quando se encontra saturada com a superfície seca



Figura 49. Picnómetros com as amostras

Foram então determinadas as diversas massas volúmicas da amostra utilizada, assim como o seu valor da absorção de água, recorrendo às seguintes expressões (Equações (10), (11), (12) e (13)):

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (10)$$

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (11)$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (12)$$

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (13)$$

Em que:

ρ_a → Massa volúmica do material impermeável das partículas (mg/m^3)

ρ_a → Massa volúmica das partículas secas em estufa (mg/m^3)

ρ_{ssd} → Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (mg/m^3)

WA_{24} → Absorção de água (%)

M_1 → Massa da amostra saturada com superfície seca (g)

M_2 → Massa do picnómetro + vidro relógio + amostra + água (g)

M_3 → Massa do picnómetro + vidro relógio + água (g)

M_4 → Massa da amostra seca (g)

Na tabela seguinte, apresentam-se os resultados obtidos para todos os parâmetros mencionados imediatamente acima (Tabela 6):

Tabela 6. Valores das diversas massas volúmicas determinadas, assim como da absorção de água para o agregado de fracção granulométrica 0/4

Parâmetros Determinados	Ensaio A	Ensaio B
ρ_a	2.570	2.573
ρ_{rd}	2.551	2.552
ρ_{ssd}	2.558	2.560
WA_{24}	0.281	0.326

De acordo com as Estradas de Portugal (E.P., 2009), não existem ainda valores comparativos para a massa volúmica de agregados utilizados em microaglomerados. Relativamente à absorção de água, esta deve ser igual ou inferior a 1%, logo, o tipo de agregado empregado está de acordo com a regulamentação.

5.2.2. Filer

O filer é adicionado à mistura com o objectivo de controlar a rotura da emulsão betuminosa, e para além disso, provoca o aumento da coesão do microaglomerado, isto é, fortalece as suas forças internas, evitando a separação dos componentes da mistura. A quantidade de filer a utilizar deve rondar 1% da massa dos agregados, e pode ser cimento ou cal hidráulica (Clérigo, 1999-b; ISSA, 2005-b).

Para o presente trabalho utilizou-se cimento, e fez-se variar as percentagens entre 1% e 2%.

5.2.3. Emulsão betuminosa

São vários os autores a afirmarem que a emulsão apropriada para microaglomerados betuminosos a frio deve ser catiónica e de rotura controlada. O tempo de rotura deve ser

controlado para que seja possível proceder à mistura de todos os componentes e à subsequente aplicação no pavimento, sem que se dê a rotura antes de o processo terminar. Para isso, deve-se garantir aproximadamente 45 segundos entre a mistura dos componentes e o fim da sua aplicação. A rotura deve acontecer logo após o término deste processo, para que o microaglomerado endureça rapidamente e seja possível uma rápida reabertura da via ao tráfego. No entanto, a estabilidade da emulsão ao armazenamento e ao transporte não deve ser posta em causa. Já a modificação pode ser atribuída ao betume, antes de este ser incorporado na emulsão, ou em alternativa, pode ser realizada à própria emulsão, após a sua produção.

Como referido no Capítulo 4, foram escolhidas duas emulsões cuja modificação foi feita à própria emulsão após a sua produção.

5.2.4. Aditivo

O aditivo controlador de rotura, em conjunto com a emulsão, tem o objectivo de controlar o tempo que a mistura leva a romper. Para além disso, melhora a adesividade entre os agregados e a emulsão betuminosa. Dependendo do emulsionante utilizado na emulsão, o tipo de aditivo que se utiliza para controlar o tempo de rotura varia, e tem que estar em consonância com o emulsionante. Pode até trata-se do mesmo produto, ou possuir apenas pequenas diferenças (Clérigo, 1999-b; RF, 2008). Desta forma:

- Nas emulsões em que o emulsionante utilizado foi o Aditivo M, foi necessário produzir o aditivo controlador da rotura. Para isso, utilizaram-se três componentes: água, o próprio emulsionante e ácido clorídrico (para controlar o pH entre 2.5 e 3).
- Para as emulsões em que o emulsionante utilizado foi o Aditivo J, o controlador de rotura empregado denomina-se “Aditivo K” (representado na Figura 50), e tem a mesma proveniência do Aditivo J.

Segundo o autor Clérigo (1999-b), a quantidade ideal de aditivo a incorporar num microaglomerado pode atingir os 2%, podendo em alguns casos não ser necessária a sua utilização.



Figura 50. Aditivo K

5.2.5. Água

A água é um componente de extrema importância para este tipo de revestimento superficial, dado que influencia directamente a consistência da mistura. Assim como a emulsão e o aditivo, a água condiciona também o tempo de rotura da mistura e consequentemente o tempo necessário para reabrir a via ao trânsito. Esta condiciona ainda a adesividade entre a emulsão betuminosa e os agregados, factor que irá intervir no espalhamento (melhor ou pior) do microaglomerado no suporte.

A água entra de três formas distintas nos microaglomerados: na pré-molhagem dos agregados, na quantidade presente na emulsão, e por fim na própria mistura final.

A água a utilizar deve ser potável e não deve conter quaisquer produtos na sua composição que possam prejudicar a mistura, tal como sais solúveis ou produtos químicos reactivos. Esta deve ser adicionada à mistura numa quantidade aproximada a 10% da massa de agregados, no entanto, devem ser tidas em conta as condições atmosféricas do local, e ainda a humidade presente nos agregados aquando do fabrico da mistura (Clérigo, 1999-b; ISSA, 2005-b; RF, 2008).

5.3. Formulação e aplicação

A formulação e aplicação de microaglomerados betuminosos a frio são geralmente realizadas com recurso a centrais móveis de produção contínua. No entanto, este não pode

ser armazenado. A produção é feita *in situ* e a mistura é colocada imediatamente no suporte, devido ao seu reduzido tempo de rotura. Os equipamentos que realizam este trabalho designam-se centrais pavimentadoras (Branco et al., 2008).

Na Figura 51 encontra-se um esquema representativo do processo de mistura e aplicação dos materiais.

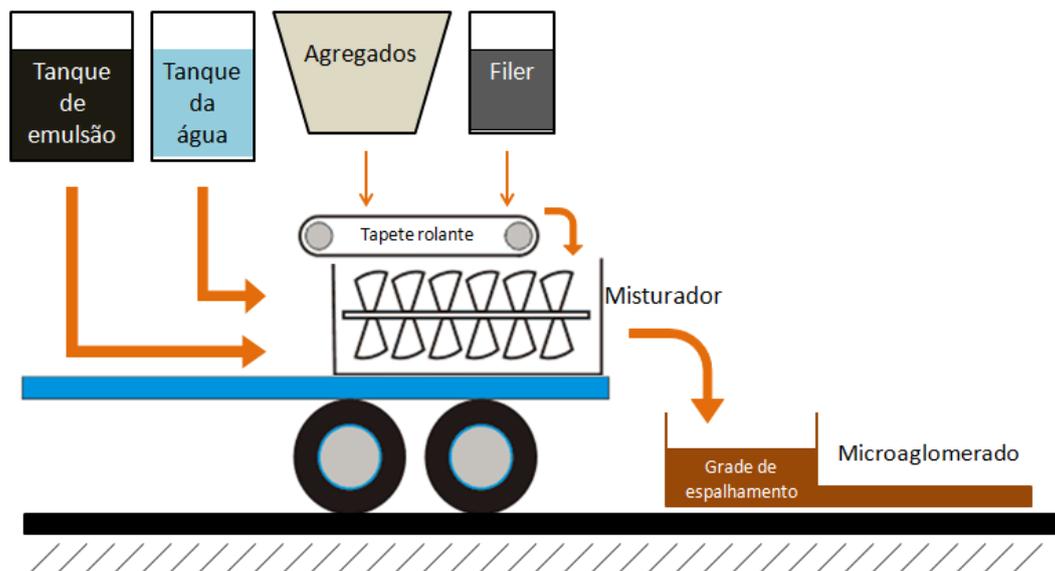
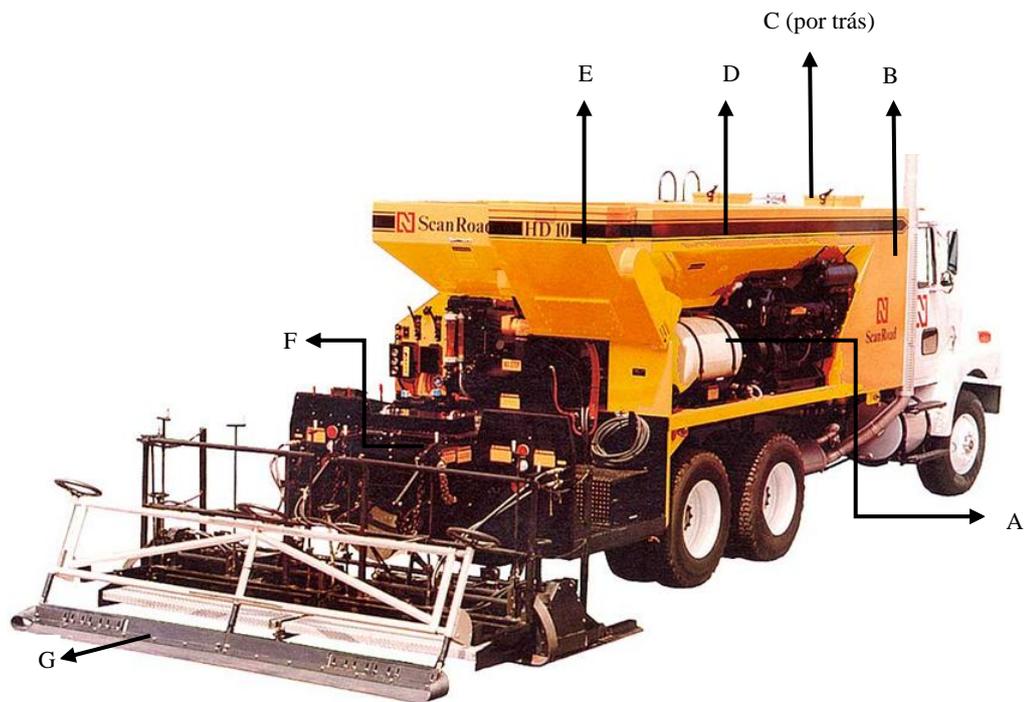


Figura 51. Modo de mistura dos componentes do Microaglomerado (Adaptado de: Insumos Viales S.A. 2011-c)

Inicialmente, os agregados caem do seu compartimento para um tapete rolante que os transporta para a parte de trás da máquina, a uma velocidade previamente estabelecida, para se obter a quantidade de agregados pretendida. O filer, já doseado, é adicionado também ao tapete rolante, sendo logo de seguida depositado, juntamente com os agregados, no misturador. A água e o aditivo controlador da rotura são os componentes que se seguem e são adicionados directamente no misturador. Nesta fase é necessário proceder a uma boa homogeneização destes materiais, para que aquando da colocação da emulsão, a sua envolvência à restante mistura seja facilitada. É então adicionada a emulsão modificada. Após todos os componentes estarem completamente misturados, o produto final é conduzido para uma grade mecânica de espalhamento, de forma rectangular. Esta vai aplicar o microaglomerado no pavimento, de uma forma contínua e homogénea, sobre uma largura e espessura previamente estabelecidas. É possível proceder a aplicações de

uma vasta gama de larguras e espessuras, dado que a grade de espalhamento permite o seu ajuste às dimensões pretendidas. (Clérigo, 1999-b; Bernucci et al., 2008).

Segue-se a imagem de um equipamento de produção de microaglomerados (Figura 52), em que é possível observar os reservatórios de cada componente que foram esquematizados acima.



Legenda: A - Tanque para aditivos; B - Tanque de emulsão; C – Tanque da água; D - Compartimento para os agregados; E – Compartimento para o filer; F – Misturador; G – Grade de espalhamento

Figura 52. Central móvel de produção contínua, para microaglomerados betuminosos a frio (Adaptado de: Insumos Viales S.A., 2011-c)

Na Figura 53 encontram-se mais pormenorizados os compartimentos onde se colocam os agregados (Figura 53-a), e o misturador (Figura 53-b):

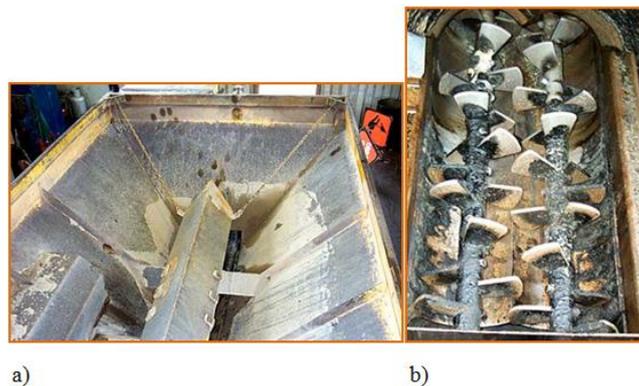


Figura 53. a) Compartimento de colocação dos agregados; b) Misturador (Insumos Viales S.A., 2011-c)

Após concluída a aplicação do microaglomerado betuminoso, segundo os autores Bernucci et al. (2008), é necessário esperar entre uma a três horas para reabrir a via ao trânsito, permitindo o rompimento e endurecimento da mistura. Já RF (2008), afirma que esta pode ser reaberta 15 minutos a uma hora após a aplicação do microaglomerado. Naturalmente, este período de tempo dependerá da formulação da mistura utilizada, assim como da origem dos materiais, entre outros aspectos. É de realçar que nesta técnica não é necessário haver compactação após a aplicação.

Um aspecto que não pode ser descurado, sob pena de se obterem resultados menos favoráveis, é a preparação do suporte. Para isso, deve-se proceder sempre à limpeza da superfície. Normalmente esta limpeza faz-se através de varrimento e/ou aplicação de jacto de ar. Em casos de condições climatéricas demasiado quentes, é necessário pulverizar o pavimento com água antes de aplicar o microaglomerado, para que este se espalhe mais facilmente e adira melhor ao suporte. Geralmente as centrais móveis estão equipadas com um mecanismo pulverizador para esse fim. Existem ainda outros casos em que se deve aplicar uma rega de colagem na superfície de suporte, também para melhorar a aderência entre as duas superfícies. Esses casos ocorrem, por exemplo, quando o suporte é executado em cimento, ou se encontra num estado bastante envelhecido. O produto utilizado é uma emulsão betuminosa catiónica de rotura rápida (Clérigo, 1999-b; Bernucci et al., 2008; RF, 2008).

Na Figura 54, expõe-se uma aplicação de microaglomerado:

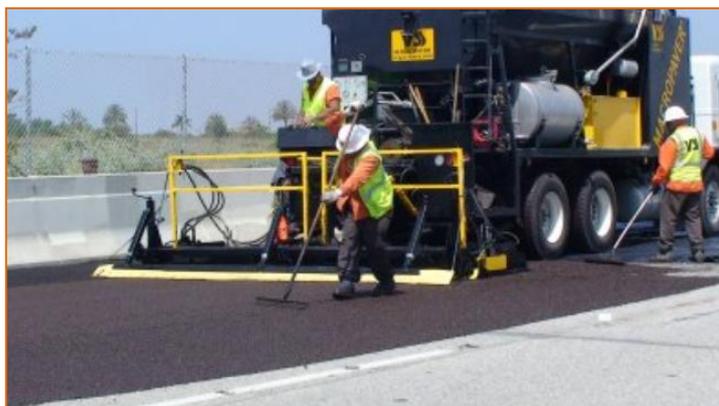


Figura 54. Caso prático de aplicação de Microaglomerados (ISSA, 2011-d)

No presente estudo, a produção do microaglomerado betuminoso a frio foi realizada logicamente a uma escala reduzida. Desta forma, procedeu-se à mistura de todos os componentes, da forma que foi descrita atrás, isto é, foram misturados pela ordem exacta em que o são em obra. Desta forma, após a adição dos agregados, filer, aditivo e água, para um recipiente, homogeneizou-se a mistura. De seguida adicionou-se a emulsão, e procedeu-se à mistura propriamente dita, durante 45 segundos (cronometrados). A mistura deveria romper aproximadamente nesse período de tempo. Consoante esta demorava mais ou menos tempo a romper, foram-se alterando as percentagens de água e cimento na mistura.

Para cada emulsão (16 emulsões no total) foram produzidos cinco microaglomerados. Trabalhou-se então com 5 fórmulas de trabalho, denominadas “a”, “b”, “c”, “d” e “e”. Três delas sofreram variações apenas na quantidade de água introduzida (“a”, “b”, “c”; sendo que a fórmula “b” contém maior quantidade de água relativamente à fórmula “a”, e a “c” contém maior quantidade de água relativamente à “b”), e as restantes duas sofreram variações apenas na quantidade de cimento (“d”, “e”; sendo que a fórmula “e” contém maior quantidade de cimento relativamente à “d”). Todos os restantes componentes foram introduzidos com a mesma dosagem.

Apesar de terem sido escolhidas duas emulsões tidas como sendo as de melhor qualidade (E8 e E12), como se expõe no Capítulo 4, foram produzidos microaglomerados para todas as emulsões fabricadas, de forma a que fosse possível proceder a uma comparação de resultados mais completa. Após a produção de cada um, estes foram aplicados sobre bases de cartão. Apesar de o cartão absorver uma parte da água presente na

mistura e poder influenciar os resultados, considerou-se este facto como uma simulação de condições de aplicação em obra em período seco, dado que dariam origem à evaporação de uma parte da água, tendo desta forma um efeito muito semelhante.

Apresentam-se, na Tabela 7, as percentagens aconselhadas para cada componente da mistura:

Tabela 7. Dosagem aconselhada para cada material que compõe um microaglomerado betuminoso a frio

Produtos	Percentagens indicadas
Filer - Cimento	1% - 2%
Aditivo	0% - 2%
Água	± 10%
Emulsão	11% - 13%

Uma vez que os intervalos aconselhados para a dosagem de cada material são já bastante reduzidos, optou-se por não se apresentar as 5 fórmulas de trabalho utilizadas (“a”, “b”, “c”, “d”, “e”). No entanto, para as diferenciar, é indispensável utilizar-se como referência, as variações de percentagens de água e cimento que foram já indicadas.

Após a produção e aplicação dos microaglomerados correspondentes a cada emulsão betuminosa sobre bases de cartão, aplicaram-se algumas misturas também no exterior, para se observar o seu comportamento num suporte real e submetidas às condições climáticas.

5.4. Ensaios a realizar para a caracterização dos microaglomerados

O controlo de qualidade de um microaglomerado é feito com o recurso a alguns ensaios. Normalmente começa-se por se realizar um ensaio empírico. Este consiste em verificar se o microaglomerado ao ser produzido, não rompe antes de 45 segundos, sendo que deve romper logo após esse período de tempo. Como foi já exposto no presente capítulo, este é o período de tempo que o equipamento leva a misturar todos os componentes da mistura e a aplicá-la no pavimento, e faz parte do controlo de qualidade dos microaglomerados betuminosos a frio.

A seguir descrevem-se outros ensaios que se devem realizar a este tipo de revestimento superficial. Apresentam-se também os resultados obtidos durante o estudo, embora não tenha sido possível a realização de alguns ensaios, facto explicado de seguida.

5.4.1. Consistência

Consiste em avaliar a consistência de uma mistura, isto é, verificar se a mistura tem a quantidade de água necessária para que se obtenha um bom desempenho. Este ensaio é baseado na norma EN 12274-3 (CEN, 2002-a), e consiste em colocar a mistura num cone normalizado (como se pode observar na Figura 55), alisando-se a superfície. De seguida levanta-se o cone na vertical, cronometram-se 10 segundos e faz-se a leitura da consistência nas marcações existentes na placa horizontal, também normalizada.



Figura 55. Cone utilizado para a avaliação da consistência da mistura

O intervalo de valores que deve ser atingido, está compreendido entre 2 e 3%, como é possível observar no gráfico da Figura 56. No entanto, este ensaio não se aplica para todos os microaglomerados, nomeadamente para os que são produzidos com o intuito de serem aplicados em locais que serão reabertos ao tráfego muito rapidamente. Isto porque a presença do(s) aditivo(s) controladores do tempo de rotura que, ao provocarem a rotura pouco tempo após a produção da mistura, impedem a realização do ensaio antes da emulsão romper. Nos casos em que o microaglomerado é modificado com fibras, o ensaio à consistência não é, de igual modo, aplicável (RF, 2008).

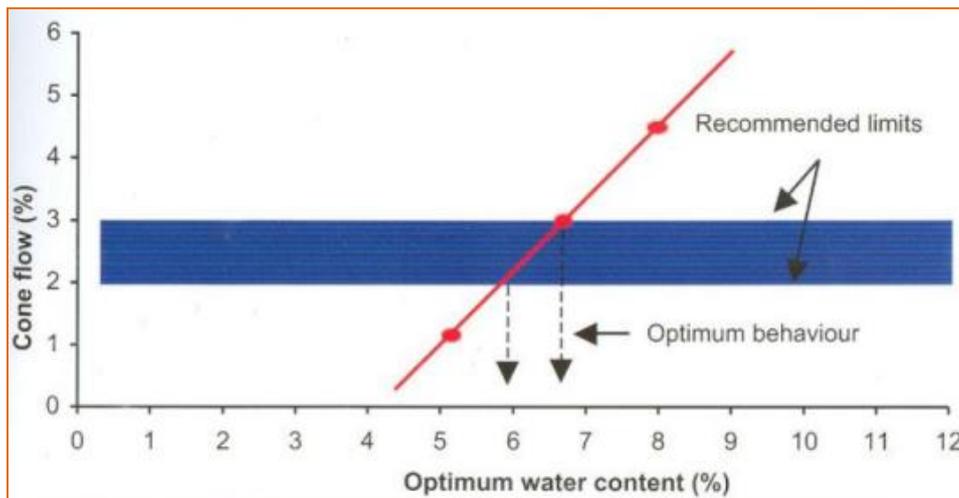


Figura 56. Determinação do teor em água ótimo, através do ensaio à consistência (RF, 2008)

O gráfico anterior indica ainda, um intervalo de valores para o teor em água correspondente à consistência ideal de uma mistura (entre 6% e 7%). No entanto, uma vez que não se obteve sucesso no ensaio à consistência, não se determinou por esta via, o teor em água respectivo. O teor em água de uma mistura foi determinado com base na norma EN 13074 (CEN, 2002-b), e apresenta-se descrito no Capítulo 6.3.2 do presente trabalho.

5.4.2. Taxa de aplicação

A taxa de aplicação de uma mistura traduz a massa aplicada, por área de aplicação, tendo em conta a norma EN 12274-6 (CEN, 2002-d). Para microaglomerados betuminosos, a taxa de aplicação é função da fracção granulométrica dos agregados utilizados. Segundo RF (2008), devem ser seguidos os seguintes requisitos (Tabela 8):

Tabela 8. Taxa de aplicação para microaglomerados betuminosos a frio, consoante a fracção granulométrica utilizada

Fracção Granulométrica dos Agregados	0/4	0/6	0/8 a 0/10
Taxa de Aplicação para Microaglomerados (kg/m ²)	6 a 12	10 a 16	12 a 25

Os valores apresentados na Tabela 8 encontram-se em kg/m^2 , e são calculados através da seguinte expressão:

$$y = \frac{x}{c} \quad (14)$$

Em que:

$y \rightarrow$ Taxa de aplicação (kg/m²)

$x \rightarrow$ Massa da mistura aplicada (kg)

$c \rightarrow$ Área de aplicação (m²)

Em obra, a massa de mistura que é aplicada no pavimento, é determinada pela diferença de massas da central móvel com e sem os componentes da mistura. A área de aplicação é facilmente mensurada em obra.

Para os microaglomerados realizados em escala laboratorial, para o presente trabalho, calculou-se a respectiva taxa de aplicação. Dado que os agregados utilizados são de fracção granulométrica 0/4, o valor da taxa de aplicação a aplicar deve estar compreendido entre 6 kg/m² e 12 kg/m². Procedeu-se ao cálculo deste parâmetro para algumas aplicações, verificando-se o cumprimento do intervalo estabelecido.

5.4.3. Determinação da coesão da mistura

A avaliação da coesão da mistura é efectuada segundo a norma EN 12274-4 (CEN, 2003-a), e tem como objectivo averiguar qual o tempo de cura necessário a uma mistura, e consequentemente, o tempo necessário para reabrir a via ao tráfego. Consiste na aplicação de uma tensão numa pequena amostra de microaglomerado com dimensões normalizadas.

A tensão aplicada é de 200 *kPa*, e é induzida por diversas vezes após terminada a produção, nomeadamente 15, 30, 60, 90 e 120 minutos após. A coesão do microaglomerado é dada por um momento torçor e é expressa em *N.m*. Consoante o seu resultado para cada período de tempo, averigua-se o estado coesivo da mistura, podendo-se também concluir qual o tipo de tráfego indicado para a mistura em causa. Segue-se uma imagem do equipamento destinado ao ensaio (Figura 57):



Figura 57. Equipamento para ensaio à coesão de microaglomerados (Bernucci et al., 2008)

5.4.4. Determinação do desgaste

Trata-se de um ensaio que determina o teor mínimo de ligante necessário a uma mistura, para que esta apresente um bom desempenho ao nível do desgaste. Para isso, duas amostras de microaglomerado, com dimensões normalizadas, são submetidas à aplicação de uma força, como se pode observar na Figura 58. Estas amostras devem ser imersas em água antes do ensaio: uma durante uma hora e outra durante seis dias. Só após esse tempo, são ensaiadas, registando-se a massa de ambas antes e após o ensaio. O presente ensaio é realizado com base na norma EN 12274-5 (CEN, 2003-b), e é também conhecido como WTAT, que significa “Wet Track Abrasion Test”.



Figura 58. Equipamento para WTAT (Bernucci et al., 2008)

5.5. Resultados obtidos e conclusões

Após efectuar uma observação cuidada (em termos visuais) de todos os microaglomerados produzidos, foi possível observar que as misturas de melhor qualidade, tal como era de esperar, são as misturas que foram produzidas utilizando as duas emulsões escolhidas com base nos resultados dos ensaios (E8 e E12). Por este motivo, apresentam-se seguidamente as imagens destes microaglomerados, alcançados com as duas emulsões em causa (Figura 59 e Figura 60):

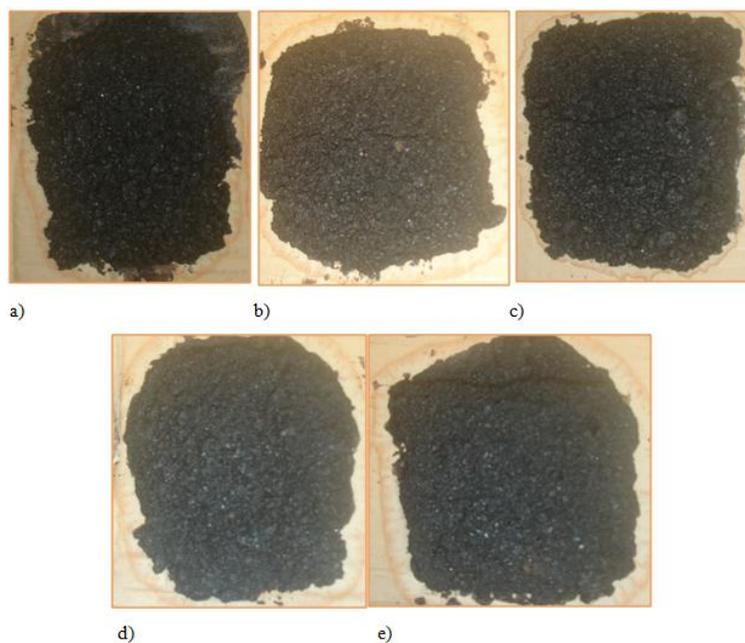


Figura 59. Microaglomerados concebidos com a emulsão E8 (betume base da refinaria de Matosinhos, com y % de Aditivo J, e com promotor de adesão), utilizando 5 fórmulas de trabalho (“a”, “b”, “c”, “d”, “e”)

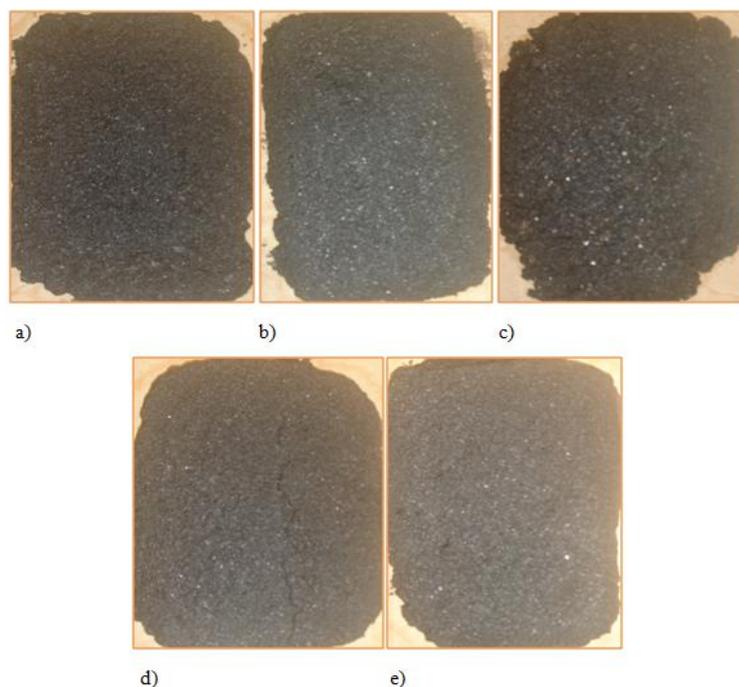


Figura 60. Microaglomerados concebidos com a emulsão E12 (betume base da refinaria de Sines, com y % de Aditivo J, e sem promotor de adesão), utilizando 5 fórmulas de trabalho (“a”, “b”, “c”, “d”, “e”)

Abordando agora os tempos de rotura de cada um, ao efectuar as misturas no recipiente, todas elas romperam após os 45 segundos. No entanto, as misturas “a”, e “d” ficaram demasiado fluidas, rompendo apenas minutos após a sua aplicação. As misturas “b”, “c” e “e” romperam mais rapidamente. Das três, a mais eficaz neste aspecto foi a “c”, dado a percentagem de água a menor. No entanto essa quantidade de água encontrava-se já bastante abaixo da recomendada, pelo que se eliminou esta formulação. As misturas “a” e “d” demoraram bastante tempo a romper. Desta forma, os melhores microaglomerados finais foram produzidos com as dosagens correspondentes às formulações “b” e “e”. Este resultado observa-se para os microaglomerados produzidos com ambas as emulsões (E8 e E12), e trata-se de uma das conclusões principais que se retirou do presente estudo de microaglomerados.

Ao longo da produção dos diversos microaglomerados (não apenas os que utilizaram as emulsões E8 e E12), foi possível observar vários factos:

- Ao produzir os microaglomerados com as emulsões que utilizaram betume da refinaria de Matosinhos, foi possível observar significativas diferenças nas misturas, ao incorporar, ou não, o promotor de adesão. Os microaglomerados que não possuíam este produto, apresentavam um aspecto “deslavado”, isto é, não existia uma adesividade suficiente entre o ligante e os agregados. Ao incorporar este composto, é notável a diferença de adesão entre ambos.
- Ao produzir os microaglomerados com as emulsões que utilizaram betume base da refinaria de Sines, já não se observava este aspecto. Em algumas misturas, não foi visível uma diferença muito significativa, enquanto que noutras misturas, este processo era inverso, isto é, o microaglomerado comportava-se melhor com as emulsões que não possuíam o promotor de adesão na sua constituição. Atribui-se este facto à heterogeneidade verificada nas várias fracções de agregado utilizadas, ressaltando a necessidade de caracterizar plenamente o agregado em utilização, não só no início do estudo laboratorial, mas ao longo das várias fases do processo de produção.
- No que diz respeito às misturas com diferentes percentagens de água, era notável a demora que estas apresentavam a romper, para os casos com a dosagem superior. Ocorreram também casos, em que colocando a percentagem menor de água, a mistura rompia precocemente.

- Relativamente aos microaglomerados com diferentes percentagens de filer (fórmulas “d” e “e”), tal como era esperado, observou-se uma diminuição do tempo de rotura, com o aumento da dosagem do filer.

Como foi já referido, após todas as produções e aplicações realizadas, optou-se por aplicar as fórmulas de trabalho que melhor tinham resultado (“b” e “e”) no exterior, e observar os seus comportamentos, dado que as condições seriam diferentes. O objectivo é efectuar 4 aplicações: com as duas emulsões (E8 e E12), e com as duas fórmulas de trabalho (“b” e “e”). No entanto, em tempo de apresentar nesta dissertação, apenas se executaram as duas fórmulas de trabalho correspondentes à emulsão E8.

Abaixo encontram-se duas imagens do microaglomerado que foi executado utilizando a emulsão E8, e a fórmula de trabalho “b” (Figura 61). É notável a mudança de cor da mistura, que resulta do rompimento da emulsão, passando de castanho para preto.



Figura 61. Microaglomerado efectuado com a emulsão E8, e fórmula de trabalho “b”, logo após aplicação (foto à esquerda), e um dia após aplicação (foto à direita)

Seguem-se agora, os microaglomerado que foram executados utilizando a emulsão E8, e a fórmula de trabalho “e” (Figura 62):



Figura 62. Microaglomerado efectuado com a emulsão E8, e a fórmula de trabalho “e”, logo após aplicação (foto à esquerda), e um dia após aplicação (foto à direita)

Durante o processo, foi tida especial atenção ao tempo de rotura que as misturas apresentavam. Como foi já referido atrás, o tempo de rotura normal de um microaglomerado betuminoso a frio pode variar, mas após 3 horas no máximo, este deverá estar completamente seco e rígido, sendo possível reabrir as vias ao tráfego. No entanto, neste caso, não foi isso que se verificou. Só aproximadamente um dia após aplicação, as misturas se apresentaram com condições de rigidez suficiente.

Seguem-se então, as principais conclusões retiradas do estudo dos microaglomerados.

5.5.1. Resumo das principais conclusões da produção de microaglomerados betuminosos a frio

Ao comparar cada microaglomerado produzido para as duas emulsões escolhidas (E8 e E12), concluiu-se que as melhores formulações são as que ostentam as dosagens presentes nas fórmulas “b” e ”e”. Apenas com o intuito de recapitular, estas duas fórmulas contêm a dosagem de água intermédia, e a percentagem de filer superior, respectivamente.

Pode-se ainda concluir que, de uma forma geral, é possível dizer que os microaglomerados produzidos com betume base originário da refinaria de Matosinhos se comportam melhor com promotor de adesão, enquanto que os microaglomerados produzidos com betume base originário da refinaria de Sines, apresentam melhor desempenho sem promotor de adesão.

Retomando o objectivo inicial desta dissertação, o que se pretendia era produzir microaglomerados utilizando emulsões fabricadas com betumes Galp Energia, confirmando a sua adequabilidade para o revestimento de superfícies. Pretendia-se modificar quimicamente a emulsão, de forma a garantir a sua estabilidade para este tipo de utilização, e respeitando as composições, compatibilidades e comportamentos de cada um dos aditivos. O resultado obtido é consequência de um conhecimento profundo das propriedades químicas de cada um dos seus componentes (aditivos e betume base) e de uma optimização do processo de aplicação, cujo desempenho se enquadra nos padrões de qualidade exigíveis para o microaglomerado betuminoso a frio.

É ainda de salientar as condições climatéricas em que o microaglomerado foi aplicado: temperaturas baixas (8°C a 15°C, aproximadamente). Este aspecto realçou a necessidade de contemplar esta variável no processo de aplicação. É necessário garantir que é possível cumprir com os tempos de cura da mistura, bem como, uma mistura eficaz dos componentes e homogeneidade na aplicação. O microaglomerado ficou, ainda, submerso por períodos entre 10 a 14 horas, apresentando uma excelente resistência à degradação e acção da água, o que constitui uma variável adicional.

Tendo em conta o que se alcançou, mesmo o tempo de rotura sendo superior ao que se ambicionava, os resultados foram bastante gratificantes e promissores, e é possível afirmar que o objectivo foi atingido.

6. SLURRY COLORIDO

O Slurry Colorido trata-se de um revestimento superficial para pavimentos. Este pode ser pigmentado ou translúcido. A sua cor pode ser introduzida através dos agregados que podem ser pigmentados, ou através da adição de um pigmento. É produzido com uma emulsão de resina sintética, e é, tal como os microaglomerados, uma mistura a frio.

O slurry colorido é adequado principalmente para pavimentos industriais, zonas de estacionamento de veículos com tráfego ligeiro, ciclovias, passeios pedonais, entre outros com função idêntica. Ao ser aplicado, o suporte deve estar completamente limpo, assim como húmido.

Contém uma taxa de aplicação que varia entre os 3 e os 5 kg/m^2 . No entanto esta varia consoante a espessura pretendida para a camada. Para taxas de aplicação acima dos 3 kg/m^2 , devem ser aplicadas duas camadas da mistura (ProbiGalp, 2009).

De seguida, enumeram-se e descrevem-se os constituintes deste tipo de revestimento superficial, assim como todo o estudo sobre ele desenvolvido, nomeadamente a formulação, os ensaios realizados, os resultados obtidos e por fim as conclusões retiradas.

Pretende-se ainda, salientar o principal objectivo desta etapa do estudo: produzir *slurries* coloridos, incorporando diferentes ligantes sintéticos.

6.1. Constituintes e sua descrição

Procedeu-se à concepção de diversos *slurries* coloridos, impondo a sua coloração através da adição de pigmentos. Foram utilizados três pigmentos distintos. Para além dos pigmentos, fez-se variar outro elemento: o tipo de ligante sintético, isto é, a emulsão. Estudaram-se quatro ligantes sintéticos diferentes, provenientes da ProbiGalp, que se intitularam de A, B, C e D. Seguidamente apresentam-se as suas principais características (Tabela 9):

Tabela 9. Características dos 4 ligantes sintéticos utilizados

Propriedades	Ligante A	Ligante B	Ligante C	Ligante D
Resíduo Sólido (%)	50	50	51 ± 1	50 ± 1
Água (%)	50	50	50 ± 1	50 ± 1
Viscosidade Brookfield (mPa.s)	50 a 300	6000 a 12000	500 a 2500	500 a 3000
pH	8 a 9	7.5 a 8.5	7.5 a 8	8 a 9
TMFF - Temperatura Mínima de Formação de Filme (°C)	10	16 ± 1	25	19 ± 1
Agente Coalescente - Relativamente à Emulsão (%)	1	1	2	1

Procedendo-se a uma análise das propriedades das diferentes emulsões sintéticas, é possível verificar que ambas contêm uma quantidade aproximada de água na sua constituição (50%). Um outro factor bastante relevante é a temperatura mínima de formação de filme (TMFF), isto é, a temperatura a que se forma uma camada à superfície da emulsão, por evaporação da água. Esta camada não se deve formar, visto que vai dificultar a trabalhabilidade da emulsão, logo é necessário adicionar um determinado componente ao slurry aquando da sua concepção, para diminuir essa temperatura mínima. Este elemento é um agente coalescente, que irá actuar quando a temperatura ambiente for inferior à TMFF da emulsão. Caso esta seja superior, o agente coalescente não acarreta qualquer efeito para a mistura. No presente caso, o ligante C é o que apresenta uma TMFF mais elevada (25°C), logo é o que possui a maior probabilidade de formação de filme, sendo este o motivo da necessidade de uma quantidade mais elevada de agente coalescente, relativamente aos restantes ligantes.

Para além destes ligantes, o slurry colorido é composto ainda por areia, água, filer, pigmento e alguns aditivos.

No que diz respeito à areia, esta é de origem siliciosa, isto é, tem na sua constituição mais de 99% de sílica (SiO_2), e foram utilizadas duas classes granulométricas distintas: areia fina e areia grossa (Sifucel - Sílicas, 2007-a; Sifucel - Sílicas, 2007-b).

O filer utilizado é denominado farinha de sílica, e como o próprio nome indica, a sua natureza é sílica de alta pureza (Sifucel - Sílicas, 2007-c).

O pigmento tem como único objectivo atribuir cor à mistura. No entanto, dependendo da sua natureza, as características do slurry colorido vão ser alteradas,

nomeadamente a consistência. Os pigmentos são classificados de acordo com a sua origem, composição química, cor, processo de preparação e uso, embora seja possível fazer a sua divisão apenas em pigmentos orgânicos e pigmentos inorgânicos. Os primeiros estão disponíveis numa alargada gama de cores brilhantes, e têm um grande poder de coloração. Os segundos são muito estáveis química e termicamente. Não são tão tóxicos para o homem nem para o ambiente. Dividem-se ainda em naturais e sintéticos (Bondioli et al., 1998). Para o presente trabalho, utilizaram-se três pigmentos (amarelo, vermelho e azul), dado que o composto activo dos dois primeiros é o óxido de ferro (pigmentos inorgânicos naturais), e do último é a ftalocianina (pigmento orgânico).

Adicionaram-se ainda, alguns aditivos à mistura, que lhe atribuíram determinadas características:

- Aditivo AD-I - Permite que a cor da mistura não se altere devido à acção do sol. Torna a taxa de evaporação de água mais lenta, isto é, retarda a secagem. Desta forma, e em conjunto com o agente coalescente, impede também a formação de filme.
- Aditivo AD-II - Ajuda a dispersar o pigmento e as cargas minerais, isto é, permite uma distribuição mais uniforme entre todos os constituintes da mistura.
- Aditivo AD-III - Tem a função de atribuir uma maior ou menor consistência à mistura, consoante a percentagem introduzida, interferindo substancialmente na trabalhabilidade da mistura.

6.2. Formulação

Como foi já referido, foram utilizados três pigmentos distintos, e quatro tipos de ligantes sintéticos. Desta forma, para cada pigmento (amarelo, vermelho e azul), produziram-se quatro misturas (uma com cada ligante – A, B, C, D). Resultaram então, 12 tipos de *slurries* coloridos distintos.

Foi partindo de uma fórmula generalizada para a concepção de slurry colorido, que se produziram as referidas misturas. Dependendo do ligante sintético empregado em cada mistura, foi necessário recorrer a um ajustamento das dosagens utilizadas na fórmula de partida, visto que os referidos ligantes possuem diferentes propriedades (Tabela 9). Caso fossem utilizadas dosagens iguais, a consistência das misturas, iria variar excessivamente

de ligante para ligante, o que impossibilitaria o cumprimento das especificações para a consistência (Capítulo 6.3.1). Desta forma, optou-se por alterar a percentagem de apenas um dos constituintes: a água, visto que esta intervém directamente na consistência da mistura (para além da percentagem de agente coalescente que é diferente para o ligante C).

Segue-se uma tabela com intervalos representativos das dosagens utilizadas nas misturas dos 12 *slurries* coloridos:

Tabela 10. Dosagens utilizadas para a produção de Slurry Colorido

Componente	%
Ligante Sintético	8 - 25
Aditivo AD-I	3 - 7
Água	0 - 19
Aditivo AD-II	0 - 4
Filer	9 - 24
Pigmento	1 - 5
Areia Fina	6 - 20
Areia Grossa	33 - 46
Aditivo AD-III	0 - 2
Outros	< 1

6.3.Descrição dos ensaios

O slurry colorido deve apresentar uma determinada consistência, para que possa estar de acordo com os requisitos exigíveis.

Após a produção de cada fórmula, foi testada a sua consistência, tal como para os microaglomerados betuminosos a frio. Este ensaio foi realizado continuamente até se alcançar a consistência exigida (entre 2 e 3%). Uma vez atingido esse valor, a mistura ficou concluída, passando-se de seguida à determinação do seu teor em água.

6.3.1. Consistência

Procedeu-se então, à avaliação da consistência de cada slurry colorido que se produziu, com base na norma EN 12274-3 (CEN, 2002-a). Colocou-se também a mistura

no cone (Figura 63), alisou-se a superfície, levantou-se o cone na vertical, e cronometraram-se 10 segundos. Após este tempo, fez-se a leitura da consistência nas marcações existentes na placa horizontal.



Figura 63. Ensaio de Consistência

6.3.2. Teor em água

Determinou-se também o teor em água das quatro misturas, segundo a EN 13074 (CEN, 2002-b). Sumariamente, colocou-se uma certa quantidade da mistura num tabuleiro, levando-o à estufa a 50°C, durante aproximadamente 24h, registando a massa da mistura antes e após a sua permanência na estufa. A diferença de massa permite obter o teor em água presente na mistura.

6.4. Resultados e conclusões

Após várias formulações do slurry, conseguiu-se atingir um valor aceitável para a consistência, isto é, entre 2 e 3%, como já se verificou na Figura 55 do capítulo anterior, e como é possível observar na Figura 64.

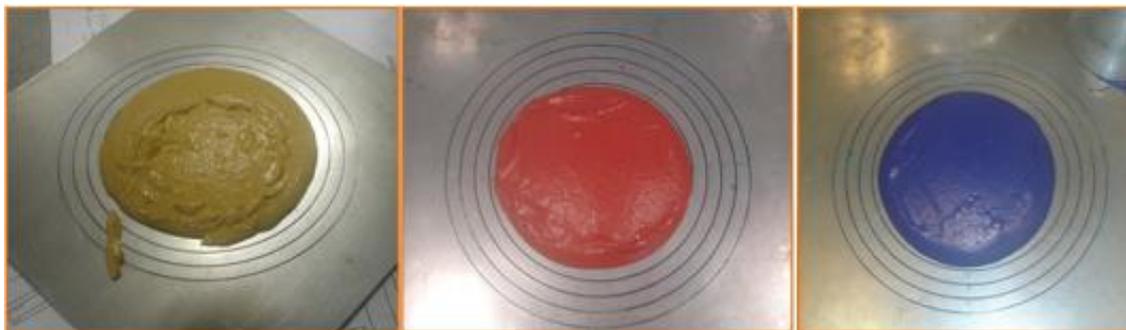


Figura 64. Resultado do ensaio à consistência

Relativamente ao teor em água das 4 misturas, segue-se uma tabela com os resultados obtidos (Tabela 11), onde é possível comparar a percentagem de água que se colocou na produção de cada slurry colorido, com o seu teor em água determinado através do ensaio normalizado. É apresentado ainda, o gráfico correspondente aos valores de teor em água (Figura 65):

Tabela 11. Intervalos da percentagem de água e teor em água, para cada ligante e correspondente pigmento

Ligante	Pigmento	Água Colocada na Mistura (%)	Teor em Água (%)
A	Amarelo	1 - 5	11 - 15
B	Amarelo	2 - 6	13 - 17
C	Amarelo	0 - 4	10 - 14
D	Amarelo	0 - 4	9 - 13
A	Vermelho	7 - 11	19 - 23
B	Vermelho	7 - 11	17 - 21
C	Vermelho	0 - 4	9 - 13
D	Vermelho	0 - 4	9 - 13
A	Azul	9 - 13	18 - 22
B	Azul	9 - 13	19 - 23
C	Azul	1 - 5	11 - 15
D	Azul	1 - 5	10 - 14

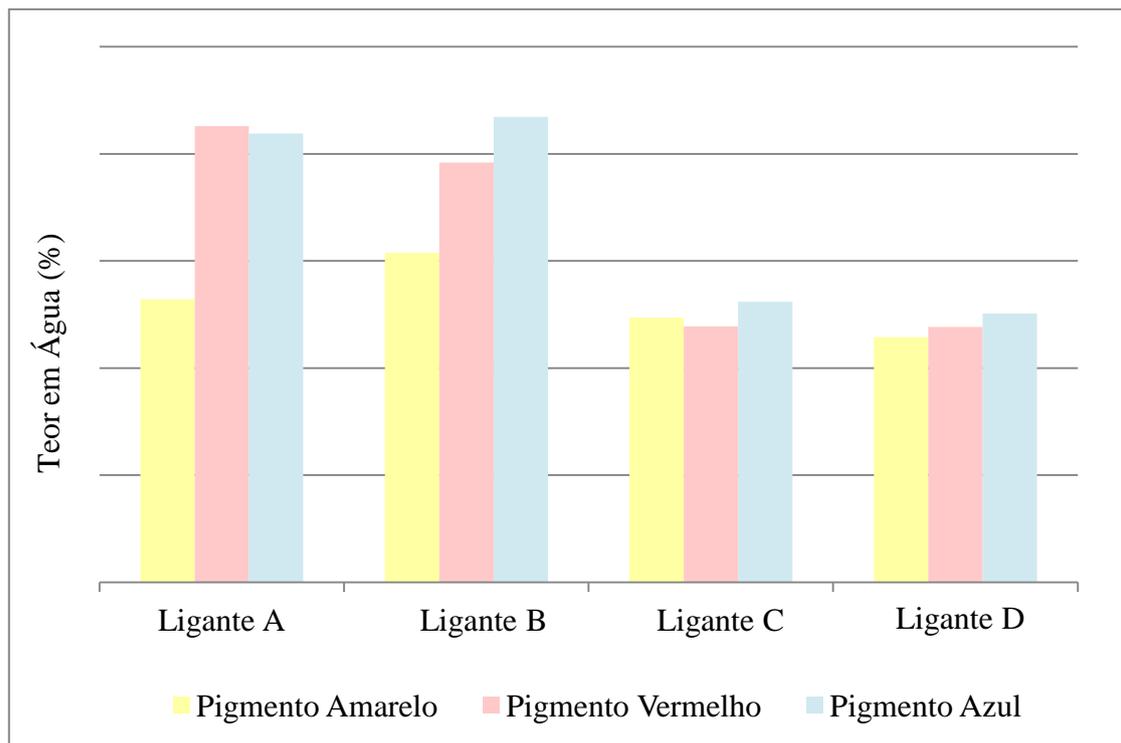


Figura 65. Comparação do teor em água entre ligantes e pigmentos

Dado que a origem dos pigmentos amarelo e vermelho é a mesma, o teor em água deveria ser semelhante (variado apenas de ligante para ligante). Este aspecto verificou-se apenas para os ligantes C e D, que não necessitaram de qualquer percentagem de água na sua constituição para se obter uma boa consistência da mistura. No entanto para os ligantes A e B, isto não se verificou. As misturas com pigmento vermelho necessitaram de uma maior quantidade de água relativamente às com pigmento amarelo. Este facto pode ser explicado com a natureza química dos pigmentos: óxido de ferro III ($F_{e2}O_3$), e óxido de ferro II (F_eO), respectivamente. O óxido de ferro reage com a água formando um composto básico, no entanto, os seus comportamentos em solução são diferentes, devido aos iões F_e^{3+} e F_e^{2+} , respectivamente. Observando as reacções químicas apresentadas nas equações (15) e (16), é possível observar que o óxido de ferro III necessita de mais água para neutralizar, explicando o consumo de água superior ao óxido de ferro II.



Relativamente às misturas realizadas com o pigmento azul, estas possuem um valor de teor em água superior às restantes, tal como era de esperar, dado que o composto activo deste pigmento não é o mesmo dos restantes pigmentos.

Tendo em conta a Figura 56, conclui-se que os valores do teor em água para todas as misturas deveriam estar compreendidos entre 6% e 7%. No entanto, os cálculos que foram efectuados contemplam o teor em água efectivamente presente em cada ligante, pelo que os valores obtidos foram naturalmente superiores aos valores de referência.

Após concluídas todas as misturas, estas foram aplicadas em provetes betuminosos, como se pode observar na figura seguinte (Figura 66):

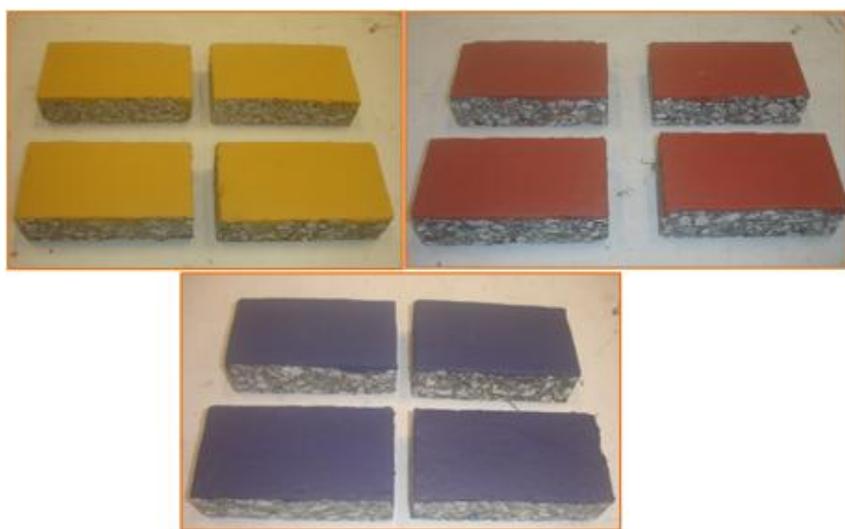


Figura 66. Aplicação dos slurries coloridos com os ligantes A, B, C e D da esquerda para a direita e de cima para baixo

6.4.1. Resumo das principais conclusões da formulação de Slurry Colorido

Para finalizar, é possível concluir que o objectivo inicial foi atingido, dado que, utilizando os 4 ligantes sintéticos referidos, conseguiram-se produzir os 12 tipos de *slurries* coloridos propostos, e com valores de consistência dentro do intervalo de referência. Apesar do teor em água ter dado percentagens superiores às tabeladas, este aspecto não invalida o estudo realizado, pelo motivo acima explicado.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

As conclusões das diferentes etapas do trabalho foram sendo apresentadas ao longo dos diferentes capítulos, contudo pode-se sublinhar alguns dos aspectos mais pertinentes do presente trabalho e para trabalhos futuros.

No que diz respeito aos Microaglomerados Betuminosos a Frio, o balanço final é claramente positivo. No entanto, existem ainda variadíssimos pontos que podem ser explorados, tendo em vista a optimização dos resultados já alcançados. Desta forma, apresentam-se como trabalhos futuros os seguintes pontos:

- Apostar em novos emulsionantes, uma vez que estes intervêm directamente nas misturas;
- Alterar as suas percentagens, dado que este factor influencia consideravelmente as características das emulsões e consequentemente o desempenho dos microaglomerados;
- Experimentar novos aditivos no betume, visto estes também serem detentores de uma relevante importância no comportamento dos microaglomerados.

Deste modo, irá com certeza ser possível produzir microaglomerados ainda com melhores características e principalmente com um tempo de rotura bastante inferior, para que possa concorrer com os restantes produtos existentes no mercado. Por fim, sugere-se e ambiciona-se, também como trabalho futuro, a realização de um trecho experimental de microaglomerado.

Relativamente ao Slurry Colorido, obtiveram-se também resultados satisfatórios: conseguiu-se obter as 12 misturas com uma consistência normalizada. Ainda assim, existem sempre aspectos que podem ser alterados, de forma a melhorar os resultados. Apresenta-se como trabalho futuro a realização de testes com vários tipos de pigmentos, diferentes dos utilizados no presente estudo.

Como balanço final, a nível de formação específica, há a salientar um aprofundar de conhecimentos, permitindo instruções técnicas em particular na área estudada. Foi também de elevada importância no que diz respeito à área dos pavimentos em geral, uma vez que o estágio laboratorial permitiu o contacto com as demais especialidades por esta área abrangidas. Por fim, trata-se de uma área em constante desenvolvimento na Engenharia Civil, pelo que permite uma prolongada investigação, apostando num futuro com soluções cada vez mais optimizadas, tanto a nível funcional como económico. Toda a experiência adquirida foi, portanto, uma enorme mais-valia.

8. BIBLIOGRAFIA

- ATIC (2000). Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração. NP EN 933-1. Instituto Português da Qualidade. Portugal, Novembro 2000.
- Benta, A. (2009). "Técnicas de Conservação e de Reabilitação de Pavimentos Rodoviários." Apresentações das aulas de Tecnologias da Conservação e Reabilitação de Pavimentos - Universidade de Aveiro.
- Bernucci, L. B., L. M. G. d. Motta, et al. (2008). "Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros."
- Bondioli, F., T. Manfredini, et al. (1998). Pigmentos Inorgânicos: Projecto, Produção e Aplicação Industrial. Cerâmica Industrial. **3 (4-6)**: 13-17.
- Branco, F., P. Pereira, et al. (2008). Pavimentos Rodoviários. Coimbra, Almedina.
- CEN (1999-a). Bitumen and bituminous binders - Determination of water content in bitumen emulsions - Azeotropic distillation method. EN 1428. European Committee for Standardization. Bruxelas, Outubro 1999.
- CEN (1999-b). Bitumen and bituminous binders - Characterization of perceptible properties. EN 1425. European Committee for Standardization. Bruxelas, Outubro 1999.
- CEN (2002-a). Slurry Surfacing - Test methods - Part 3: Consistency. EN 12274-3. European Committee for Standardization. Bruxelas, Janeiro 2002.
- CEN (2002-b). Bitumen and bituminous binders - Recovery of binder from bitumen emulsions by evaporation. EN 13074. European Committee for Standardization. Bruxelas, Julho 2002.
- CEN (2002-c). Bitumen and bituminous binders - Determination of efflux time of bitumen emulsions by the efflux viscometer. EN 12846. European Committee for Standardization. Bruxelas, Maio 2002.
- CEN (2002-d). Slurry Surfacing - Test methods - Part 6: Rate of application. EN 12274-6. European Committee for Standardization. Bruxelas, Janeiro 2002.
- CEN (2003-a). Slurry Surfacing - Test methods - Part 4: Determination of cohesion of the mix. EN 12274-4. European Committee for Standardization. Bruxelas, Fevereiro 2003.
- CEN (2003-b). Slurry Surfacing - Test methods - Part 5: Determination of wearing. EN 12274-5. European Committee for Standardization. Bruxelas, Janeiro 2003.

- CEN (2005). Bitumen and bituminous binders - Framework for specifying cationic bituminous emulsions. EN 13808. European Committee for Standardization. Bruxelas, Maio 2005.
- CEN (2007-a). Bitumen and bituminous binders - Determination of the softening point - Ring and Ball method. EN 1427. European Committee for Standardization. Bruxelas, Março 2007.
- CEN (2007-b). Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetration. EN 1426. European Committee for Standardization. Bruxelas, Março 2007.
- CEN (2008). Slurry Surfacing - Requirements. EN12273. European Committee for Standardization. Bruxelas, Abril 2008.
- CEN (2009-a). Bitumen and bituminous binders - Determination of residue on sieving of bituminous emulsions, and determination of storage stability by sieving. EN 1429. European Committee for Standardization. Bruxelas, Março 2009.
- CEN (2009-b). Bitumen and bituminous binders - Determination of breaking behaviour - Part 1: Determination of breaking value of cationic bituminous emulsions, mineral filler method. EN 13075-1. European Committee for Standardization. Bruxelas, Março 2009.
- CEN (2009-c). Bitumen and bituminous binders - Determination of residual binder and oil distillate from bitumen emulsions by distillation. EN 1431. European Committee for Standardization. Bruxelas, Março 2009.
- CEN (2009-d). Bitumen and bituminous binders - Determination of settling tendency of bituminous emulsions. EN 12847. European Committee for Standardization. Bruxelas, Março 2009.
- CEN (2009-e). Bitumen and bituminous binders - Determination of the pH value of bituminous emulsions. EN 12850. European Committee for Standardization. Bruxelas, Março 2009.
- CEN (2009-f). Bitumen and bituminous binders - Determination of particle polarity of bituminous emulsions. EN 1430. European Committee for Standardization. Bruxelas, Março 2009.
- Clérigo, V. M. S. (1999-a). As Emulsões Betuminosas e suas Aplicações. As Emulsões Betuminosas e suas Aplicações. Lisboa: 1-10.
- Clérigo, V. M. S. (1999-b). Microaglomerados. As Emulsões Betuminosas e suas Aplicações. Lisboa: 1-11.
- E.P. (2009). 14.03 - Pavimentação. Características dos materiais. E. d. Portugal, Fevereiro 2009.
- EAPA, E. A. P. A.-. (2010-a). "Warm Mix Asphalt GAPA Position Paper." Consultado a 13 Novembro, 2011, e disponível em <http://www.eapa.org/asphalt.php?c=112>.

- EAPA, E. A. P. A.-. (2010-b). "What is Asphalt." Consultado a 13 Novembro, 2011, e disponível em <http://www.epa.org/asphalt.php?c=78>.
- Engineers, M. S. (2006). "Positive Displacement Sliding Vane Pumps." Consultado a 23 Novembro, 2011, e disponível em <http://www.michael-smith-engineers.co.uk/products/vane-pumps/vane-pumps.htm>.
- Engman, M., A. James, et al. (1998) "Specifying Slurry Surfacing Emulsion Quality: Particle Size and Size." 13.
- Galp Energia. (2010). "Emulsões betuminosas " Consultado a 23 Outubro, 2011, e disponível em <http://www.galpennergia.com/PT/ProdutosServicos/Produtos/Betumes/Paginas/EmulsoesBetuminosas.aspx>.
- Garrido, P. (1999). Emulsões Betuminosas Componentes e Fabrico. As Emulsões Betuminosas e suas Aplicações. Lisboa: 1-8.
- Group, C. (2011). "Sorensen Invents the pH Scale." Consultado a 17 Novembro, 2011, e disponível em <http://www.carlsberggroup.com/COMPANY/RESEARCH/Pages/pHValue.aspx>.
- Hunter, R. N. (2000). Asphalts in Road Construction. Londres, Thomas Telford.
- Insumos Viales S.A. (2011-a). "Qué es un micro...?" Consultado a 9 Novembro, 2011, e disponível em http://www.insumosviales.com.ar/01_micro/01_que_es/que_es.html.
- Insumos Viales S.A. (2011-b). "Diferencias entre Lechadas Asfálticas y Microaglomerados." Consultado a 9 Novembro 2011, e disponível em http://www.insumosviales.com.ar/01_micro/04_docs/docs/diferencias_entre_lechada_y_micro.pdf.
- Insumos Viales S.A. (2011-c). "Método de Trabajo." Consultado a 14 Novembro, 2011, e disponível em http://www.insumosviales.com.ar/01_micro/03_metodo/4_maquinas/metodo_4_maquinas.html.
- IPQ (2003). Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água. NP EN 1097-6. Instituto Português da Qualidade. Portugal, 2003.
- ISSA (2005-a). Recommended Performance Guidelines for Emulsified Asphalt Slurry Seal. A105 (Revised). International Slurry Surfacing Association. Annapolis, Novembro 2005.
- ISSA (2005-b). Recommended Performance Guidelines For Micro-Surfacing: A 143 (Revised). International Slurry Surfacing Association. Annapolis, Maio 2005.
- ISSA, I. S. S. A.-. (2011-a). "What Is Slurry?" Consultado a 11 Novembro, 2011, e disponível em

- http://www.slurry.org/index.php?option=com_content&view=article&id=73:whatis_slurry&catid=7:faqs&Itemid=160.
- ISSA, I. S. S. A.-. (2011-b). "What is Micro Surfacing?" Consultado a 11 Novembro, 2011, e disponível em http://www.slurry.org/index.php?option=com_content&view=article&id=75:whatis_micro&catid=7:faqs&Itemid=160.
- ISSA, I. S. S. A.-. (2011-c). "Slurry Surfacing." Consultado a 11 Novembro, 2011, e disponível em http://www.slurry.org/index.php?option=com_rsgallery2&page=slideshow&gid=2&Itemid=53.
- ISSA, I. S. S. A.-. (2011-d). "Micro Surfacing." Consultado a 16 Novembro, 2011, e disponível em http://www.slurry.org/index.php?option=com_rsgallery2&page=inline&gid=3&limit=1&Itemid=53&limitstart=1.
- Lima, R. M. F. and J. A. M. d. Luz (2001). "Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes." Rem: Revista Escola de Minas **54**: 155-159.
- Lopes, L. G. R. and R. M. Fortes (2008). Estudo da aderência pneu-pavimento para diferentes tipos de texturas de pavimentos em pistas de kartódromos. Coninfra - Congresso de infra-estrutura de transportes. Sao Paulo - Brasil.
- Mr.Pothole, P. R. S. I.-. (2009-a). "Types of Failure - Rutting." Consultado, e disponível em http://www.mrpothole.com/learning/types_of_failures/rutting.html.
- Mr.Pothole, P. R. S. I.-. (2009-b). "Types of Failure - Shoving / Corrugation." Consultado, e disponível em http://www.mrpothole.com/learning/types_of_failures/shoving_corrugation.html.
- Müller, U. F. d. S. C.-J. M. (2009). "Bombas." Consultado a 23 Novembro, 2011, e disponível em http://www.enq.ufsc.br/muller/operacoes_unitarias_qm/BOMBAS.pdf.
- OSUSA, O. y. S. d. U. S. A.-. (2008). "Micropavimento sobre pavimento de hormigão em Rosario." Consultado a 13 Novembro, 2011, e disponível em http://www.osusa.com.uy/ficha_obra.php?id=7.
- Pereira, E. and R. Costa (1999). Armazenagem, Manuseamento, Amostragem, Transporte, Segurança e Ambiente. As Emulsões Betuminosas e suas Aplicações. Lisboa: 1-38.
- Pereira, R. X. L. (2010). Misturas Betuminosas Temperadas: Estudo da Interação Aditivo-Ligante. Departamento de Engenharia Civil. Aveiro, Universidade de Aveiro. **Obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil**.
- ProbiGalp (2009). Urban Pav - Slurry Sintético Colorido, Setembro 2009.

- ProbiGalp. (2010-b). "Emulsões Betuminosas." Consultado a 15 Outubro, 2011, e disponível em http://www.probigalp.pt/prod_item1_frame.php.
- ProbiGalp (2010-c). Ficha Técnica do Produto - C60B5[SLU], Setembro 2010.
- ProbiGalp (2011-a). "Emulsões Catiónicas." Novas designações (EN 13808:2005).
- ProbiGalp (2011-b). Ficha Técnica do Produto - Baseline C50BF5, Outubro 2011.
- Químicos, P. L. V. d. P. (2007). "Fundamentos." Consultado a 23 Novembro, 2011, e disponível em http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=92&Itemid=196#5.
- Read, J., D. Whiteoak, et al. (2003). The Shell Bitumen Handbook. Londres, Thomas Telford.
- RF, E. d. F.-. (2008). Bitumen Emulsions. Paris.
- Roma, L. F. (1999). Revestimentos Superficiais. As Emulsões Betuminosas e suas Aplicações. Lisboa: 1-17.
- Shahin, M. Y. (2005). Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots, Springer Science+Business Media, LLC.
- Sifucel - Sílicas, S. A. (2007-a). Informação Técnica - Areia Fina, 2007.
- Sifucel - Sílicas, S. A. (2007-b). Informação Técnica - Areia Grossa, 2007.
- Sifucel - Sílicas, S. A. (2007-c). Informação Técnica - Farinha de Sílica, 2007.
- Torrico, C. C., R. Lucero, et al. (2011). "Evaluacion del ahuellamiento con equipo de alto rendimiento." Consultado, e disponível em http://www2.udec.cl/~provincial/trabajos_pdf/29CristianCabreraAhuellamineto.pdf.
- Vicente, A. M. M. (2006). A Utilização de Betumes Modificados com Borracha na Reabilitação de Pavimentos Flexíveis. Departamento de Engenharia Civil. Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. **Obtenção do Grau de Mestre em Vias de Comunicação.**