



M 2014

RECICLAGEM DE PAVIMENTOS BETUMINOSOS

INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS RECICLADAS A FRIO COM EMULSÃO

SARA FERREIRA ESTEVES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

RECICLAGEM DE PAVIMENTOS BETUMINOSOS

Influência da granulometria nas propriedades
mecânicas de misturas recicladas a frio com emulsão

SARA FERREIRA ESTEVES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professor Doutor Jaime Manuel Queirós Ribeiro

Coorientador: Professora Doutora Liedi Bariani Bernucci

JULHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais, Dália e Luís, pilares da minha vida

“Criar a mobilidade certa pode regenerar os centros urbanos, aumentar a produtividade e tornar uma cidade atrativa para todos os utentes”

Ban Ki-moon, Secretário Geral das Nações Unidas, 2013

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luís e Dália Esteves por me terem proporcionado esta experiência.

Às minhas irmãs, Cristiana e Daniela Esteves, por me orientaram em muitas das minhas decisões.

À Ivone e ao Carlos, que me terem acolhido tão carinhosamente na sua casa, a quem ficarei eternamente grata por tudo que me proporcionaram durante a minha estadia em São Paulo.

Ao Carlos João, pela paciência e ajuda na formatação da dissertação.

Ao Lucas Andrade pela partilha e discussão de informação do seu próprio trabalho de mestrado.

À Professora Liedi Bernucci por me ter dado a oportunidade de desenvolver esta pesquisa, e aos colaboradores do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, pela disponibilidade de equipamento e esforço no cumprimento da minha apertada calendarização, em especial ao Erasmo e Vanderlei.

Um agradecimento especial à Professora Kamilla Vasconcelos, que me orientou em todo o trabalho laboratorial, sempre com dedicação e profissionalismo.

Ao Professor Jaime Ribeiro, que me orientou, mesmo a tantos quilómetros de distância.

Ao grupo Arteris pelo fornecimento de material necessário à realização das misturas.

RESUMO

A manutenção das estradas é uma atividade necessária que deve ser realizada de forma contínua para assegurar os níveis de traficabilidade das estradas. Dependendo do grau de severidade da degradação do pavimento, os serviços associados à sua manutenção e reabilitação geram volumes significativos de material, tipicamente rejeitado e depositado em locais desapropriados.

Com vista ao seu aproveitamento, têm vindo a surgir novas soluções, nomeadamente a sua reutilização nas camadas de novos pavimentos. Para tal é necessário conhecer este material e como ele pode ser utilizado, de maneira a que apresente um comportamento adequado perante a solicitação do tráfego e das condições climáticas, principais fatores que influenciam a estrutura do pavimento.

No presente trabalho avaliou-se um determinado projeto de mistura a utilizar na camada base, que incorpora o material resultante de ações de fresagem da estrada Fernão Dias, concessionada ao Grupo Arteris. Mais especificamente, compôs-se duas dosagens cuja variável foi a granulometria utilizada, uma mais grossa e outra mais fina, misturadas a frio com emulsão.

Esta pesquisa contemplou atividades laboratoriais desenvolvidas visando fundamentar o efeito dos materiais em estudo, utilizando os resultados de comportamento mecânico como parâmetros de avaliação. Os provetes moldados foram submetidos a ensaios de resistência à tração indireta, ensaios de resistência à compressão simples e a ensaios de determinação de módulo de resiliência.

A pesquisa bibliográfica associada procurou contextualizar as técnicas utilizadas na fresagem e reciclagem do pavimento, e a confirmação da importância da escolha e aplicação controlada da granulometria dos agregados na formação das novas misturas, garantindo o melhor desempenho do pavimento reciclado.

Os resultados obtidos demonstraram a excelência da utilização de granulometrias mais finas sobre granulometrias com partículas de maiores dimensões, uma vez que apresentam valores superiores para as três propriedades mecânicas estudadas.

PALAVRAS-CHAVE: Fresagem, RAP, Reciclagem, Emulsão, Granulometria

ABSTRACT

Road maintenance is a needful activity that must be done continuously to ensure road trafficability levels. Depending on the degradation severity, those services will generate huge amounts of material, which are typically deposited in non-appropriate places.

Eying its re-use, new solutions have emerged, namely its use as layers in new road pavements. For that we need to know this material and how it can be used in a way for it to present an appropriate behavior to the traffic solicitation and climate conditions, the main factors that influence the pavement structure.

In the present work a certain type of mix design used on the base layer was evaluated, which incorporates the material resulting from milling actions done on the Fernão Dias road, concessioned to Grupo Arteris. More specifically two dosages were composed, varying the aggregate size distribution, one thicker and the other thinner, mixed with cold emulsion.

This research addressed lab activities developed for substantiating the effect of the studied materials, using the mechanical behavior results as evaluation parameters. The molded specimens were submitted to Indirect Tensile Strength tests, Unconfined Compressive Strength tests and tests to determine the Resilient Modulus.

The related bibliographic research aimed to contextualize the techniques used in the milling and recycling of road pavements and to confirm the importance of choosing, and controlled application of the aggregate size distribution in the formation of new mixtures, ensuring the best performance of the recycled pavement.

The obtained results demonstrate the excellence on using finer gradation over larger gradation, since they present higher values for the three mechanical properties studied.

KEYWORDS: Milling, RAP, Recycling, Emulsion, Gradation

ÍNDICE GERAL

Resumo	i
Abstract	iii
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Símbolos, Acrônimos e Abreviaturas	xiii

1. INTRODUÇÃO

1

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
---	----------

1.2. JUSTIFICAÇÃO DO ESTUDO	3
--	----------

1.3. OBJETIVOS	4
-----------------------------	----------

1.4. ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	4
---	----------

2. MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO E TÉCNICAS DE CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS BETUMINOSOS

7

2.1. INTRODUÇÃO	7
------------------------------	----------

2.2. PAVIMENTOS	7
------------------------------	----------

2.3. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS E ESTRUTURAIS DOS PAVIMENTOS	9
--	----------

2.4. DEGRADAÇÃO DOS PAVIMENTOS	10
---	-----------

2.5. PRINCIPAIS MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS BETUMINOSOS	11
---	-----------

2.5.1. FENDILHAMENTO DAS CAMADAS BETUMINOSAS	11
--	----

2.5.2. DEFORMAÇÕES PERMANENTES À SUPERFÍCIE	11
---	----

2.5.3. DEGRADAÇÕES DA SUPERFÍCIE	12
--	----

2.6. CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO DO PAVIMENTO BETUMINOSOS	12
---	-----------

2.7. SELEÇÃO DE TÉCNICAS DE CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO	18
---	-----------

2.8. NOVAS SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS BETUMINOSOS	21
--	-----------

3. FRESAGEM DE PAVIMENTOS BETUMINOSOS

25

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	25
--	-----------

3.2. APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE FRESAGEM NA REABILITAÇÃO	26
--	-----------

3.3. CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE FRESAGEM	27
---	-----------

3.3.1. FRESAGEM SUPERFICIAL	27
-----------------------------------	----

3.3.2. FRESAGEM RASA	28
----------------------------	----

3.3.3. FRESAGEM PROFUNDA	28
--------------------------------	----

3.4. APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE FRESAGEM EM PAVIMENTOS BETUMINOSOS	28
3.4.1. FRESAGEM PARA CORREÇÃO DE DEFEITOS SUPERFICIAIS	28
3.4.2 FRESAGEM DE ÁREAS DESCONTÍNUAS	29
3.4.3 FRESAGEM CONTÍNUA DE TODA A FAIXA	29
3.4.4. FRESAGEM EM CUNHA	30
3.4.5. FRESAGEM PARA CORREÇÃO DA INCLINAÇÃO DO PAVIMENTO	31
3.4.6. FRESAGEM SUPERFICIAL PARA SONORIZAÇÃO	31
3.4.7. FRESAGEM DE REMATE	32
3.5. VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE FRESAGEM	32
3.5.1. MANUTENÇÃO DO PERFIL DO PAVIMENTO	32
3.5.2. MANUTENÇÃO DO NIVELAMENTO NOS TRATAMENTOS LOCALIZADOS	32
3.5.3. MANUTENÇÃO DO NÍVEL JUNTO A DESCONTINUIDADES DO PAVIMENTO	33
3.5.4. CORREÇÃO DE DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS	33
3.6. PROBLEMAS DECORRENTES DA FRESAGEM DE PAVIMENTOS	33
3.6.1 DEGRAU NA VIA	33
3.6.2. APARECIMENTO DE BURACOS	33
3.6.3. DESCOLAGEM DE “PLACAS” DO REVESTIMENTO BETUMINOSO	33
4. TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS	35
4.1. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS BETUMINOSOS: EVOLUÇÃO HISTÓRICA	35
4.2. MÉTODOS DE RECICLAGEM COM RAP	36
4.2.1. RECICLAGEM A QUENTE EM CENTRAL – CENTRAIS E PROCESSOS DE FABRICO	37
4.2.1.1. Centrais Contínuas	38
4.2.1.2. Centrais Descontínuas	38
4.2.2. RECICLAGEM A QUENTE IN SITU	39
4.2.3. RECICLAGEM A FRIO IN SITU COM EMULSÃO BETUMINOSA	40
4.2.4. RECICLAGEM A FRIO IN SITU COM ESPUMA DE BETUME	41
4.2.4.1 Espuma de Betume e suas características	41
4.2.4.2 Execução	42
4.2.5. RECICLAGEM A FRIO IN SITU COM CIMENTO	43
4.2.5.1 Cimento	43
4.2.5.2 Aplicação do cimento	43
5. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS BETUMINOSOS A FRIO IN SITU COM EMULSÃO BETUMINOSA	45
5.1. INTRODUÇÃO	45
5.2. PROCESSO DE RECICLAGEM	45
5.3. AGENTES	47

5.4. EMULSÃO BETUMINOSA	48
5.4.1. INTRODUÇÃO	48
5.4.2. CONSTITUINTES	49
5.4.2.1. Betume	49
5.4.2.2. Água de dispersão	50
5.4.2.3. Emulsionantes	50
5.4.3. TIPOS.....	50
5.4.4. EMULSÕES BETUMINOSAS MODIFICADAS COM POLÍMEROS.....	51
5.4.6. PRODUÇÃO DE EMULSÕES	52
5.4.7. VISCOSIDADE.....	53
5.4.8. ROTURA	53
5.5. LIGANTES HIDRÁULICOS	55
 6. ENSAIOS LABORATORIAIS	 57
6.1. INTRODUÇÃO	57
6.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E JUSTIFICAÇÃO DA COMPOSIÇÃO	58
6.2.1 VALORES PRÉ DEFINIDOS	58
6.2.1.1 Curva granulométrica resultante da fresagem	58
6.2.1.2 Cimento	59
6.2.1.3 Emulsão.....	60
6.2.2. MATERIAL FRESADO – RAP (RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT)	61
6.2.3. ÁGUA	64
6.3. PLANO DE ENSAIO	68
6.4. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	69
6.4.1. ENSAIO PROCTOR.....	69
6.4.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA	69
6.4.3. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	71
6.4.4. ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	74
6.5. VARIAÇÃO DO TEMPO E TEMPERATURA DE CURA	76
6.6. VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA EM PROPRIEDADES MECÂNICAS	80
 7. CONCLUSÕES	 85
 BIBLIOGRAFIA.....	 87

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 - Estrutura de um pavimento flexível (adaptado [11])	8
Fig.2.2 - Distribuição de carga através da estrutura do pavimento [6]	9
Fig.2.3 - Fenda longitudinal [13]	13
Fig.2.4 - Fenda transversal [13]	14
Fig.2.5 - Fendilhamento tipo “pele de crocodilo” [13]	15
Fig.2.6 - Rodeira [13]	15
Fig.2.7 - Ondulações da superfície [13]	16
Fig.2.8 - Superfície de pavimento degradada [13]	17
Fig.2.9 - Pelada [13]	17
Fig.2.10 - Ninho [13]	17
Fig.3.1 – Possíveis composições de um grumo resultante da fresagem a frio [21]	27
Fig.3.2 – Intervenções em áreas descontínuas	29
Fig.3.3 – Fresagem contínua de toda a faixa de rodagem	30
Fig.3.4 – Execução de fresagem em cunha e situação após tratamento	31
Fig.3.5 – Execução da fresagem de remates [22]	32
Fig.4.1 – Central Betuminosa Contínua [15]	38
Fig.4.2 – Central Betuminosa Descontínua (Método com RAP a frio) [15]	39
Fig.4.3 - Central Betuminosa Descontínua (Método com RAP a quente) [15]	39
Fig.4.4 – Central móvel para reciclagem de misturas betuminosas [15]	40
Fig.4.5 – Produção de betume espuma [12]	42
Fig. 5.1 - Esquema das operações de reciclagem do pavimento	46
Fig. 5.2 - Secção de um pavimento antes e após a reciclagem	47
Fig. 5.3 - Exemplos de emulsão betuminosa catiónica (esquerda) e emulsão betuminosa aniónica (direita)	51
Fig. 5.4 - Fabrico de emulsões	52
Fig. 5.5 - Rotura de uma emulsão catiónica	55
Fig.6.1 – Distribuição granulométrica do material fresado	58
Fig.6.2 – Curvas de Compactação para as misturas com variação do teor de cimento no estudo do LTP [46]	59
Fig.6.3 – Curvas de compactação para as misturas (energia modificada) [46]	60
Fig.6.4 – Curvas granulométricas 1 e 2 e faixa A do DNER	62
Fig.6.5 – Curvas granulométricas 1, 2 e 3	62

Fig.6.6 – Material fresado com grumos a secar	63
Fig.6. 7 - Composição das granulometrias estabelecidas e ensacamento do material	64
Fig.6.8 – Processo de mistura: (a) adição de cimento, (b) adição de água, (c) adição de emulsão	64
Fig.6.9 – Curvas de compactação da Granulometria 1.....	65
Fig.6.10 – Curva granulométrica da Granulometria 2	65
Fig.6.11 – Três provetes com granulometria 1.....	66
Fig.6.12 – Três provetes com granulometria 2.....	66
Fig.6.13 - Valores de RT para diferentes teores de água em provetes com a granulometria 1	67
Fig.6.14 – Valores de RT para diferentes teores de água em provetes com a granulometria 2	67
Fig.6.15 - Molde e pilão utilizados no ensaio de compactação tipo Proctor modificado.....	69
Fig.6.16 – Dispositivo de carregamento com frisos	70
Fig.6.17 – Aspeto visual do provete durante o ensaio de resistência à tração indireta	71
Fig.6.18 - Deformação do provete ao longo do ensaio de resistência à compressão simples	73
Fig.6.19 – Diferença de altura dos provetes antes e depois do ensaio	74
Fig.6.20 – Ensaio de determinação de MR: (a) preparação do provete, (b) colocação da membrana, (c) realização do ensaio.....	76
Fig.6.21 – Valores médios de resistência à tração indireta em função do tempo e da temperatura de cura, utilizando a granulometria 1	78
Fig.6.22 - Valores médios de resistência à tração indireta em função do tempo e da temperatura de cura, utilizando a granulometria 2	79
Fig.6.23 - Valores de resistência à compressão simples para a granulometria 1 e 2	81
Fig.6.24 - Valores de resistência à tração indireta para a granulometria 1, 2 e 3.....	82
Fig.6.25 - Valores de módulo de resiliência para a granulometria 1	83
Fig.6.26 - Valores de módulo de resiliência para a granulometria 2	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Técnicas de Conservação e Reabilitação disponíveis [14]	20
Tabela 6.1 – Resultados de RCS para as misturas com diferentes teores de emulsão [46]	61
Tabela 6.2 - Teor de água na emulsão betuminoso utilizada	64
Tabela 6.3 – 1ª Fase	68
Tabela 6.4 – 2ª Fase	68
Tabela 6.5 – 3ª Fase	69
Tabela 6.6 – Valores indicados pela norma AASHTO T307 – 99 [45].....	74
Tabela 6.7 – Valores médios da massa específica seca média para as diferentes configurações para a granulometria 1	77
Tabela 6.8 – Valores médios de resistência à tração indireta (RT) para a granulometria 1.....	77
Tabela 6.9 - Valores médios da massa específica seca média para as diferentes configurações para a granulometria 2.....	78
Tabela 6.10 - Valores médios de resistência à tração indireta (RT) para granulometria 2	79
Tabela 6.11 - Valores médios da massa específica seca média para as diferentes configurações para a granulometria 1 e 2	80
Tabela 6.12 - Valores de resistência à compressão simples e os respectivos valores médios, para as granulometrias 1 e 2.....	80
Tabela 6.13 - Valores de resistência à tração indireta e os respectivos valores médios, para a granulometria 1 e 2	81
Tabela 6.14 - Valores de módulo de resiliência e os respectivos valores médios, para a granulometria 1 e 2.....	83

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

σ_t - Resistência à tração indireta, KPa

P - carregamento máximo, N

t - altura do provete, mm

D - diâmetro do provete, mm

MR - módulo de resiliência, MPa

σ_d - Tensão cíclica axial, MPa

ϵ_r - Extensão resiliente (recuperável) axial, mm/mm

ϵ_r - Deformação resiliente (recuperável) axial devido à tenção de desvio, mm/mm

Wótimo - Teor de água ótima

RCS – Resistência à compressão simples

RT – Resistência à tração

AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*

LTP – Laboratório de Tecnologia de Pavimentação

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

RAP - *Reclaimed Asphalt Pavement*

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR - Denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas

Fig. - Figura

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

A população mundial de 7,2 mil milhões de pessoas, estimada em meados de 2013, está projetada para crescer cerca de um milhão nos próximos 12 anos, chegando a 8,1 mil milhões em 2025 e ainda cerca de 9,6 mil milhões em 2050 [1].

No Dia Internacional do Habitat em 2013, o Secretário-geral das Nações Unidas escreveu que “por mais de uma metade de século, a maioria dos países experienciaram um crescimento urbano rápido juntamente com o aumento do uso de veículos a motor. Isto levou à expansão urbana e a um aumento da procura por uma mobilidade motorizada com um conjunto de consequências económicas, sociais e ambientais.

O transporte urbano é uma das principais fontes dos gases de efeito de estufa e causadores de problemas de saúde, devido à poluição do ar e sonora. O congestionamento de trânsito criado por sistemas de transporte não sustentáveis é responsável pelos custos económicos e de produtividade significativos para os utentes e transportadores de mercadorias (...) [2].”

Segundo o centro de notícias da ONU “ (...) as cidades do mundo em desenvolvimento continuam a sofrer os efeitos dos problemas associados à pobreza, ao subdesenvolvimento, à falta de saúde e educação e à insegurança, têm vindo a surgir novos desafios que estão a afetar as zonas urbanas, tanto nos países ricos como pobres.

Entre eles incluem-se o facto de as cidades serem emissores de gases com efeito de estufa”, referidos anteriormente, “que contribuem para as alterações climáticas e o risco de os sistemas de trânsito entrarem em rotura devido a um planeamento inadequado e a uma rápida expansão (...) [3].”

Estes movimentos expansivos provocados pelo aumento contínuo da população mundial que se tem vindo a verificar, exigem soluções imediatas que resolvam problemas e necessidades de mobilidade que antes não se colocavam. Sistemas de transporte de melhor qualidade que consigam abranger um maior número de utentes obrigam à construção de novas e melhores infraestruturas, que suportem esta rápida expansão urbana.

O desenvolvimento da sociedade implica então a promoção de adaptações ou modificações no ambiente natural, ou naquele que já não sendo o natural, era ainda um ambiente estável onde os recursos urbanos seriam suficientes. Desta forma inicia-se o processo de gestão ambiental de forma a adequar a nova realidade às necessidades individuais e coletivas. A maneira de gerir a utilização desses novos recursos é condicionante, uma vez que pode acentuar ou minimizar os impactos na renovada área urbana.

A expansão das cidades trouxe um problema de grande proporção ligado à gestão de resíduos sólidos provocados pelo setor da construção civil.

Este sector é responsável por uma parte muito significativa dos resíduos, em que se estima uma produção anual global de 100 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD).

Para além das quantidades muito significativas que lhe estão associadas, estes resíduos apresentam outras particularidades que dificultam a sua gestão, de entre as quais se destacam a sua constituição heterogénea com frações de dimensões variadas e os diferentes níveis de perigosidade de que são constituídos.

A atividade da construção civil apresenta, por si própria, também algumas especificidades, tal como o carácter geograficamente disperso e temporário das obras, que dificultam o controlo e a fiscalização do desempenho ambiental das empresas do sector.

A difícil quantificação, a deposição não controlada e o recurso a sistemas apoiados em tratamentos de fim de linha, constituem constrangimentos inerentes às características dos resíduos e do sector em causa [4].

Estas práticas conduzem a situações ambientalmente indesejáveis pois além do espaço físico exigido pelo grande volume de resíduos, existe a preocupação com a contaminação do meio ambiente, incluindo a contaminação do solo e do lençol freático.

Estimulado pela crise ecológica que se vive nos dias de hoje, diversos países têm vindo a orientar a sua ação política no sentido de motivar as suas populações e indústria a desempenhar um papel mais representativo na preservação do meio ambiente, assim como encontrar novas formas de satisfazer as suas necessidades do dia-a-dia sem prejudicar o espaço que os rodeia.

Como consequência deste panorama, a Construção Civil, assim como outras áreas industriais, teve de se adaptar a esta perspetiva ecológica que eleva o reaproveitamento de material a um nível máximo de importância. O material que seria desperdiçado, e geralmente encaminhado para locais mal preparados para o receber, ganhou relevância e passou a ser incluído no planeamento de novas obras, definindo-se assim destinos específicos para outras formas de aproveitamento ou locais de armazenamento apropriados.

No contexto do presente trabalho, em que se pretende estudar a *Influência da granulometria nas propriedades mecânicas de misturas betuminosas recicladas a frio com emulsão*, importa restringir a reflexão sobre os materiais que resultam da destruição de pavimentos envelhecidos, como consequência da reabilitação de vias existentes com o objetivo de garantir a mobilidade segura e confortável aos utentes.

Os resíduos provenientes dos serviços de pavimentação constituem uma parcela significativa neste cenário de desperdício, pois, por exemplo, estima-se que na pavimentação de uma rua rural ou urbana, considerando um quilómetro de via e desconsiderando as bermas, pode-se consumir 5,1 vezes a quantidade de agregados consumida na construção de um edifício de 15 andares e duas caves, com quatro apartamentos de 80m² por andar [5].

Em engenharia é importante relembrar que uma tecnologia de construção deve ser encarada não apenas tendo em vista o seu objetivo imediato, mas também o seu potencial de perpetuação da obra. Não se pode atuar em pavimentação exclusivamente do ponto de vista de conceção da estrutura de um pavimento e de sua construção. A obra de pavimentação é peculiar no sentido em que não termina com a conclusão do revestimento da estrutura; trata-se de obra contínua por carecer de constante manutenção que não se caracteriza por sucessões de rotinas idênticas [6]. A discussão que se coloca é,

uma vez que desta constante manutenção resulta um volume significativo de material, constituído pelo pavimento envelhecido, que destino atribuir a esses resíduos? Uma das soluções que surgiu foi a reutilização do material fresado, reciclando-o, podendo atualmente fazê-lo utilizando um leque variado de opções.

A necessidade de reciclagem dos materiais é então bastante conhecida por envolver primeiramente problemas ambientais de exploração de novas matérias-primas, bem como de deposição de resíduos de demolição de pavimentos. Ou seja, além da prática de reciclagem do material proveniente da destruição de pavimentos, conservar fontes naturais de agregado, ela reduz a preocupação em encontrar locais devidamente equipados para deposição desse material [7]. Posto isto, a utilização do material fresado (RAP - *Reclaimed Asphalt Pavement*) encontra uma vasta aplicabilidade na composição de diferentes misturas betuminosas. Tendo em mente o leque de vantagens que a reciclagem deste material apresenta, surge então uma nova área de pesquisa com um elevado potencial que avança, visando aprimorar o conhecimento sobre frenagem do material e seu reaproveitamento, impulsionando o aparecimento de novas e melhoradas tecnologias de reciclagem desta estrutura rodoviária.

No seguimento do que foi referido anteriormente, em que se expõe o panorama da crise ecológica e a importância de a reprimir, noção que tem vindo a ganhar força no quotidiano político e social dos países, devem-se também acrescentar, as razões económicas.

Sendo estas tão importantes como as anteriores, servem como um importante motor de desenvolvimento, impulsionando os técnicos a procurar novos métodos de atingir um mesmo fim com menores custos para o país ou empresa em questão. Reprocessar os materiais de pavimentação de vias deterioradas por meio de reciclagem, de forma a restaurar para níveis satisfatórios as condições de traficabilidade dessas vias, tem um elevado interesse tanto do ponto de vista técnico quanto ecológico. Mas contextualizando nos tempos de crise que se vivem atualmente, os interesses financeiros deste tipo de técnicas podem muitas vezes sobrepor-se e serem até as únicas reconhecidas pelo usuário comum.

A procura mundial de agregados destinados à construção em 2008 foi de 24,9 mil milhões de m³, tendo aumentado 2,9% por ano até 2013 e alcançado os 28,7 mil milhões de m³. Apesar de se prever um abrandamento do crescimento económico e das despesas em construção em todo o mundo, ainda haverá um aumento saudável em alguns países, estimulado pela atividade de industrialização e de construção de infraestruturas [8].

O custo dos agregados em obras viárias (terraplenagem, fundação e camadas do pavimento) representa entre 20% a 30% do custo dos materiais. Custos de demolição e remoção do betume estão sempre presentes, tanto quando o pavimento é rejeitado como quando é reutilizado; custos de produção de agregados reciclados podem ser compensados pela gestão económica dos custos de transporte e colocação em depósitos, que têm vindo a aumentar devido à escassez e restrição dos terrenos [7].

A maior consciência ambiental e os regulamentos mais restritos sobre o uso e ocupação do solo, estimulou a procura por agregados reciclados como sendo uma opção viável e substituta do agregado natural, verificando-se um aumento da sua venda em 3,9% até 2013 [8].

1.2. JUSTIFICAÇÃO DO ESTUDO

A percepção da importância do assunto exposto resultou na necessidade de estudar como o material, que resulta de ações de fresagem de pavimentos envelhecidos, poderia ser reintroduzido no circuito da construção. Sabe-se já que este processo de reutilização pode fazer-se utilizando diferentes técnicas

que, têm vindo a desenvolver-se e a serem aplicadas em grande escala na reconstrução de estradas pelo mundo fora.

Existem muitos fatores que podem influenciar na escolha do método a ser utilizado na reabilitação do pavimento, sendo que o presente trabalho vai incidir na técnica de reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa de revestimentos betuminosos. Este tipo de intervenção oferece sem dúvida, uma série de vantagens entre as quais se destacam a possibilidade de reaproveitamento de 100% do material existente; a economia de energia na exploração de novas jazidas; menos agressão ao meio ambiente; redução dos custos de manutenção das vias; e rápida execução.

A qualidade da mistura é sem dúvida o aspeto mais relevante do tema da reciclagem, logo fica evidenciada a importância da granulometria do material fresado na qualidade da mistura reciclada, motivo pelo qual vários projetos desenvolvidos levam em consideração a necessidade da sua correção granulométrica [5].

1.3. OBJETIVOS

Face ao exposto, o objetivo principal do trabalho será estudar, por meio de ensaios laboratoriais, qual a influência da granulometria do conjunto de agregados que compõem a mistura betuminosa, nas propriedades mecânicas da camada composta por esta mistura.

No presente trabalho todos os materiais utilizados em laboratório, com exceção da água, foram fornecidos pela Concessionária Grupo Arteris. O Laboratório de Tecnologia de Pavimentos (LTP), onde todos os ensaios foram executados, desenvolve parcerias com diferentes empresas, visando contribuir para o crescimento e desenvolvimento das técnicas de pavimentação, propondo assim transpor esse conhecimento para o campo. Um desses parceiros é o grupo Arteris.

1.4. ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

O trabalho está organizado em sete capítulos, cuja organização e conteúdo se resumem nesta secção.

A sequência de temas que compõem este trabalho pretende orientar o leitor segundo uma linha de pensamento que julga-se ser importante para entender melhor todo o problema que se instala em volta da manutenção de uma estrada, desde a verificação das falhas até à sua resolução.

No primeiro capítulo introdutório faz-se um enquadramento do tema em estudo, apresenta-se uma justificação ao seu empreendimento, definem-se os objetivos desse estudo e, finalmente, descreve-se a organização do trabalho.

No segundo capítulo descreve-se o modo de degradação dos pavimentos betuminosos e o processo desde a identificação das anomalias até à escolha da solução mais apropriada para a sua conservação e reabilitação.

O terceiro capítulo é dedicado à técnica da fresagem como fase integrante na manutenção de pavimentos existentes.

No quarto capítulo abordam-se algumas técnicas de reciclagem de pavimentos, incluindo alguns dos materiais mais utilizados na substituição dos agregados naturais.

O quinto capítulo é dedicado ao método de reciclagem no qual o presente trabalho se baseia, a reciclagem de pavimentos betuminosos *in situ* a frio com emulsão betuminosa.

O capítulo seis é dedicado ao estudo laboratorial, apresentando os ensaios realizados, a caracterização dos materiais utilizados e justificação do projeto de mistura, o plano laboratorial e os respetivos resultados, com exposição gráfica.

No capítulo sete apresentam-se as conclusões sobre os resultados obtidos e possíveis justificações para o comportamento do material reciclado perante os diferentes ensaios realizados.

2

MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO E TÉCNICAS DE CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS BETUMINOSOS

2.1. INTRODUÇÃO

O Homem, para melhorar o seu acesso a áreas cultiváveis e a fontes de matérias-primas, como madeira, água, minerais entre outras, e somando o desejo de expandir o seu território, criou o que hoje denominamos de estradas, cuja lembrança mais remota provém da China, país que as inventou. Bem mais tarde os romanos aperfeiçoaram estas estruturas, instalando pavimentos de drenagem, visando torna-las mais duradouras. Durante a fase da áurea Romana, mais de 80 mil Km de estradas foram construídos, permitindo aos conquistadores o transporte de legiões militares e o acesso a bens disponíveis nos territórios longínquos dominados por eles [5].

A importância de se estabelecer a comunicação entre os povos através de vias adequadas à circulação, foi ganhando força e hoje é umas das áreas com mais relevância e influência no desenvolvimento e crescimento das sociedades.

De acordo com o Banco Mundial, existem atualmente mais de 15 milhões de quilômetros de estradas pavimentadas no mundo inteiro. Cada ano, centenas de milhares de quilômetros das mesmas requerem grandes restaurações. Os governos e as autoridades locais no mundo inteiro gastam anualmente uma quantia estimada em 100 milhares de milhões de dólares norte-americanos aplicada em ações de manutenção da funcionalidade e segurança das estradas. Entretanto, devido a orçamentos inadequados para o setor de transporte e ao custo elevado da restauração convencional, o acúmulo global de estradas deterioradas é significativa [9].

2.2. PAVIMENTOS

O Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima. Deve apresentar-se como superfície lisa, desempenada e inclinações transversais exigidas pelo jogo de forças que solicitarão os veículos em circulação; deve assegurar a drenagem superficial, impedindo a infiltração de água para os solos de fundação; e aumentar a capacidade resistente do piso onde circulam os veículos degradando as cargas em profundidade de modo a garantir a estabilidade dos solos de fundação [10].

Tradicionalmente classifica-se o pavimento rodoviário tendo em conta a sua natureza estrutural, utilizando as definições clássicas de pavimento rígido, flexível e semi-rígido. Esta distinção é baseada na sua estrutura, visto que cada um destes pavimentos apresenta uma constituição diferente, com camadas diferenciadas, relativamente às características geométricas e mecânicas. Esta classificação tem gerado alguma discussão, pois assume como princípio que o pavimento apresenta um comportamento idêntico em toda a sua estrutura. Contudo, como referido, o pavimento é composto por diversas camadas com propriedades elásticas muito diferentes, resultando em respostas distintas consoante a natureza dos materiais constituintes dessas mesmas camadas.

Pode-se então dizer que os pavimentos rígidos obrigam à presença de uma camada superficial em betão e os pavimentos flexíveis são compostos por camadas de desgaste elaboradas com algum tipo de mistura betuminosa.

Ao classificar um pavimento é necessário ter presente que os termos rígido e flexível dizem respeito ao comportamento da estrutura como um todo, em especial a questão da diferença existente no que tange à transmissão de tensões para o subleito. Ocorre uma distribuição mais uniforme das pressões verticais sob a placa de betão, podendo admitir-se que tais pressões distribuem-se igualmente sobre toda a área de apoio, em contraposição no caso do revestimento em misturas betuminosa, as pressões verticais tendem a concentrar-se nas proximidades da região carregada [6].

Pavimentos Betuminosos

Os pavimentos flexíveis são compostos por uma camada superficial betuminosa (revestimento), apoiada sobre camadas de base, de sub-base e o leito do pavimento, constituídas por materiais granulares, solos tratados ou seleccionados. Dependendo do volume de tráfego, da capacidade de suporte da fundação, da rigidez e espessura das camadas, e condições ambientais, uma ou mais camadas podem ser suprimidas. Na figura seguinte, pode-se observar as diferentes camadas e materiais que podem ser utilizados na constituição de um pavimento flexível.

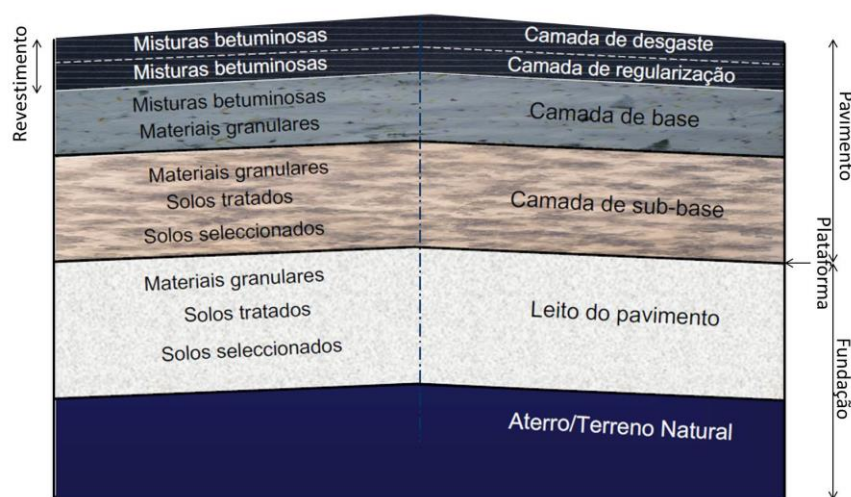


Fig.2.1 - Estrutura de um pavimento flexível (adaptado [11])

Os revestimentos das estruturas de pavimento em geral são submetidos a esforços de compressão e de tração devidos à flexão, ficando as demais camadas submetidas principalmente à compressão. Em

certos casos, uma camada subjacente ao revestimento pode ser composta por materiais estabilizados quimicamente de modo a proporcionar coesão e aumentar a sua rigidez, podendo resistir a esforços de tração. Embora possuam coesão, as camadas de solos finos apresentam baixa resistência à tração, diferentemente dos materiais estabilizados quimicamente [10].

Na Fig.2.2 pode-se visualizar, de um modo generalizado, de que maneira a carga é distribuída através da estrutura do pavimento, desde a superfície até à fundação. Como se pode verificar, a carga aplicada por uma roda à superfície é efetivamente reduzida dentro da estrutura do pavimento, espalhando-se sobre uma ampla área da fundação. As camadas na parte superior da estrutura estão sujeitas a níveis de tensão mais elevados do que aquelas mais baixas e, portanto, necessitam de ser construídas com material mais resistente [12].

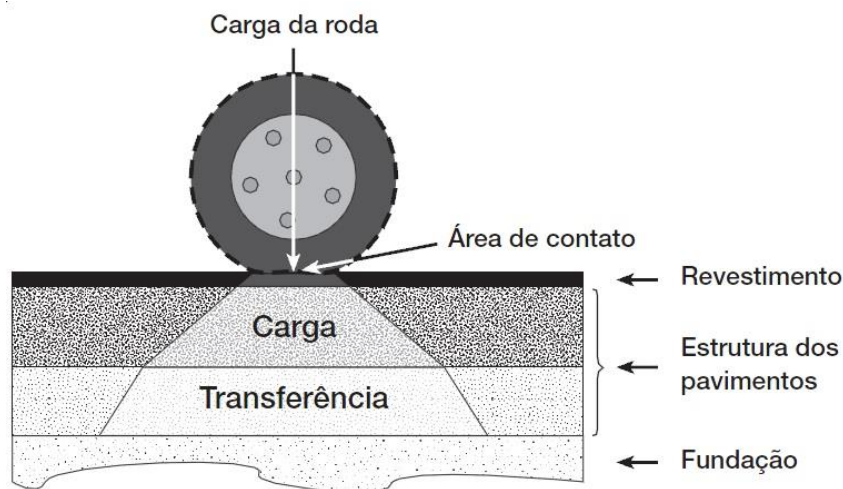


Fig.2.2 - Distribuição de carga através da estrutura do pavimento [6]

As estruturas de pavimento são projetadas para resistirem a numerosas solicitações de carga, dentro do período de projeto, sem que ocorram danos estruturais fora do aceitável e previsto. Os principais danos considerados são a deformação permanente e a fadiga. Para se dimensionar adequadamente uma estrutura de pavimento, deve-se conhecer bem as propriedades dos materiais que a compõem, a sua resistência à rutura, permeabilidade e deformabilidade, face à repetição de carga e ao efeito do clima [10].

Geralmente, somente os pavimentos flexíveis é que podem ser reciclados economicamente no local. Pavimentos rígidos construídos com betão de elevada resistência normalmente devem ser demolidos no final das suas vidas úteis [12]. Portanto, este trabalho apenas se cinge pavimentos flexíveis que são caracterizados pelas superfícies betuminosas.

2.3. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS E ESTRUTURAIS DOS PAVIMENTOS

O pavimento rodoviário destina-se à circulação de veículos em condições adequadas de segurança, conforto e economia, ou seja, ir de encontro às exigências dos utentes. Para cumprir essa função, a superfície deve possuir determinadas características, designadas como características funcionais de

entre as quais se destacam a regularidade geométrica, a textura, o atrito, a aderência e a capacidade de drenagem de águas superficiais.

Sob os efeitos da passagem dos rodados dos veículos sobre a sua superfície, em particular os veículos pesados, as estruturas dos pavimentos danificam-se progressivamente, até se chegar a uma condição de ruína estrutural, se entretanto não forem tomadas medidas de conservação adequadas.

Para que possa desempenhar adequadamente as suas funções de proporcionar a circulação de veículos em adequadas condições de segurança, economia e conforto, um pavimento rodoviários deverá possuir uma estrutura adequada que garanta que aquelas condições se mantêm acima de determinados limites ao longo da sua vida útil, sob a ação do tráfego e das condições ambientais, os quais colocariam em causa a qualidade funcional. Deverá então possuir determinadas características estruturais, que lhe confirmem capacidade de carga suficiente para o tráfego a que se destina [11].

Em suma, para os pavimentos manterem as suas características funcionais por mais tempo, é fundamental agir com regularidade sobre as características estruturais. O pavimento defronta-se então com um ciclo progressivo de serviços de manutenção associados à preservação da sua qualidade estrutural durante o seu tempo de vida de serviço.

2.4. DEGRADAÇÃO DOS PAVIMENTOS

Os materiais de construção, no decorrer da sua vida de serviço, experimentam processos de danificação e deterioração (degradação) inevitáveis que levam à alteração das suas propriedades mecânicas originais, ou seja, aquelas que governam o seu comportamento sob ações de cargas de diversas naturezas. Portanto, as propriedades dos materiais alteram-se após a construção, piorando pouco a pouco. Este fenómeno observa-se também nos materiais empregues nas camadas dos pavimentos, sendo a sua degradação motivada por cargas de veículos, produtos químicos e ações ambientais, como temperatura e humidade [1].

Não se pode estabelecer, de modo inquestionável, o processo de degradação ou de danificação estrutural de um dado pavimento, ou ainda, dos materiais que especificamente são empregues na sua estrutura. Ao se considerarem os possíveis mecanismos de rotura em pavimentos, note-se que existem diversas regiões geológicas e pedológicas; diferentes condições climáticas e morfológicas; políticas de cargas para diferentes veículos comerciais para cada país; utilização de materiais peculiares de cada zona, além de tradições construtivas e de projeto muito variadas.

A pavimentação não deve ser encarada como uma solução eterna, estabelecida após a sua execução. Para se obter condições operacionais constantes e convenientes à circulação do tráfego usuário, é imprescindível que seja estabelecida uma política de controlo do estado dos pavimentos, associado a um processo de conservação estratégico [6].

Conservação de Pavimentos

O pavimento defronta-se então com um ciclo progressivo de serviços de manutenção e conservação associados ao seu tempo de vida de serviço decorrido. Durante este tempo a necessidade de proceder a um determinado tipo de manutenção, deve ser objeto de planeamento e de projeção adequada (estimativa) [5]. Devem-se então estabelecer estratégias de conservação dos pavimentos envelhecidos. Essas estratégias passam por prever atividades de conservação constituídas por operações que têm como objetivo retardar o aparecimento de degradações ou atrasar a sua progressão, quando estas já

existem. Ou então numa perspectiva curativa, levar a cabo operações de conservação destinadas a corrigir degradações já existentes no pavimento.

A conservação dos pavimentos é promovida em atividades de rotina ou em atividades de emergência. O primeiro caso inclui operações que podem ser programadas com determinada periodicidade, tendo em vista manter um nível de serviço satisfatório, tão próximo quanto possível do estado inicial, e de acordo com a categoria da estrada. As atividades de conservação de emergência dizem respeito a operações necessárias para repor o pavimento no estado inicial, quando ocorre um dano causado por um fator imprevisível ou por falta de conservação extrema.

A conservação tem dois objetivos principais, a conservação funcional e estrutural do pavimento. As medidas de conservação que têm como objetivo conservar ou reabilitar as características funcionais do pavimento, refletem a conservação funcional. A conservação estrutural, por outro lado, traduz-se em medidas de conservação que visa conservar ou reabilitar as características estruturais, ou seja, a capacidade de carga do pavimento [11].

2.5. PRINCIPAIS MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS BETUMINOSOS

2.5.1. FENDILHAMENTO DAS CAMADAS BETUMINOSAS

- a) Fendilhamento por fadiga (com início na base das camadas)

Resulta da repetida aplicação de esforços de tração induzidos na base das camadas betuminosas pela passagem dos rodados dos veículos pesados [11].

- b) Reflexão de fendas

Resulta da propagação, às camadas superiores, de fendas existentes em camadas subjacentes a estas que, pela sua natureza (camadas com ligantes hidráulicos) ou por se encontrarem danificadas, possuem fendas ou juntas de retração [11].

- c) Fendilhamento com origem à superfície

Observa-se frequentemente em pavimentos com estruturas mais espessas, podendo ser atribuído a diversos fenómenos, tais como o envelhecimento das misturas betuminosas das camadas de desgaste, ou os estados de tensão induzidos na zona de contacto entre o pneu ou nas suas proximidades, eventualmente combinados com ações térmicas [11].

2.5.2. DEFORMAÇÕES PERMANENTES À SUPERFÍCIE

- a) Deformações com origem nas camadas de materiais granulares e de solos

Resultam do somatório das deformações plásticas nas camadas de materiais granulares e de solos que integram o pavimento e respetiva fundação, sob a ação da repetida passagem dos veículos pesados; estas deformações podem-se traduzir por depressões longitudinais nas zonas de passagem dos rodados, “rodeiras”, ou por ondulações no pavimento no sentido longitudinal, que se enquadram na designação genérica “irregularidade superficial” [11].

- b) Deformações com origem nas camadas de misturas betuminosas

Rodeiras que resultam das deformações visco-plásticas das camadas de misturas betuminosas sob a ação da repetida passagem dos veículos pesados, em particular quando estes circulam a baixa velocidade e/ou em condições de temperatura ambiente elevada. O pavimento experimenta primeira

mente um adensamento, verificando-se uma diminuição de volume, e depois uma deformação por corte, em que o volume mantém-se constante [11].

c) Deformações originadas durante a construção

Deformações permanentes da superfície atribuídas a práticas construtivas inadequadas podem ter origem em qualquer uma das diferentes camadas que constituem o pavimento e respetiva fundação, por exemplo assentamentos diferenciais devidos à heterogeneidade dos solos de fundação existentes na linha; deficiente compactação das camadas (em particular nas proximidades dos encontros das obras de arte); e o tipo de técnica utilizada no espalhamento, nivelamento e compactação das camadas de misturas betuminosas [11].

2.5.3. DEGRADAÇÕES DA SUPERFÍCIE

a) Desagregação

Consiste no desprendimento de partículas de agregado e na perda de ligante betuminoso da camada de desgaste.

As principais causas para o aparecimento de desagregação superficial estão geralmente relacionadas com a composição da mistura, que poderá ter uma quantidade de ligante insuficiente para envolver convenientemente os agregados, ou com a falta de adesividade entre o betume e os agregados, quer devido à natureza dos agregados, quer devido à alteração das propriedades do betume sob a ação dos agentes atmosféricos [11].

b) Exsudação de betume

Consiste na migração do ligante presente na mistura betuminosa para a superfície do pavimento, ocorrendo geralmente na zona de passagem dos rodados dos veículos.

As principais causas para a ocorrência de exsudação de betume estão relacionadas com a composição da mistura betuminosa, que poderá ter uma proporção excessiva de betume e/ou uma reduzida porosidade. Sob a ação da passagem dos rodados dos veículos, especialmente em tempo quente, a compressão da camada betuminosa pode, neste caso, originar a expulsão do betume para a superfície. O fenómeno será tanto mais grave quanto menos viscoso for o betume para a temperatura ambiente [11].

c) Polimento dos agregados

Consiste na perda de micro-textura superficial dos agregados, por desgaste, que provoca a redução do coeficiente de atrito entre os pneus e o pavimento, com evidentes consequências na segurança da circulação dos veículos [11].

d) Peladas

Desprendimento de blocos da camada de desgaste, que pode ser provocado por uma deficiência localizada da mistura betuminosa da camada de desgaste ou por deficiência na ligação entre esta camada e a camada subjacente [11].

2.6. CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO DO PAVIMENTO BETUMINOSOS

A caracterização do estado de um determinado pavimento passa por três estágios, a inspeção visual; a avaliação das características funcionais; e a avaliação das características estruturais.

A inspeção visual de um pavimento passa pela verificação de aspetos relacionados com características funcionais, nomeadamente a degradação e a exsudação, e aspetos relacionados com características estruturais, como deformações permanentes e fendilhamento. No registo de degradações, durante a inspeção, deve-se ter em consideração o tipo de degradação, a sua severidade, a sua extensão (m^2 , m), geralmente quantificada em área relativa afetada pela degradação. Alguns dos principais modos de degradação são apresentados em seguida.

a) Fendas longitudinais

Descrição: Fendas aproximadamente paralelas ao eixo de estrada, geralmente ao longo das rodeiras

Quantificação: Extensão em metros juntamente com o número de fendas e o nível de severidade

Níveis de severidade: Baixa – largura $<0,6mm$

Moderada – largura entre 0,6mm e 19mm e com lasqueamento moderado

Elevada – largura $> 19mm$, com lasqueamento significativo

Causa provável: Capacidade de carga insuficiente

Evolução/Consequências: Desagregação dos bordos da fenda

Penetração de água e enfraquecimento das camadas subjacentes

Aparecimento de outras fendas (pele de crocodilo)

Eventual bombagem



Fig.2.3 - Fenda longitudinal [13]

b) Fendas Transversais

Descrição: Fendas aproximadamente perpendiculares ao eixo da estrada

Quantificação: Extensão em metros juntamente o nível de severidade

Níveis de severidade: Baixa – largura $<0,6mm$

Moderada – largura entre 0,6mm e 19mm e com lasqueamento moderado

Elevada – largura > 19mm, com lasqueamento significativo

Causa provável: Deficiência de construção (proximidades de obras de arte)

Evolução/Consequências: Desagregação dos bordos da fenda

Penetração de água e enfraquecimento das camadas subjacentes



Fig.2.4 - Fenda transversal [13]

c) Fendilhamento tipo “pele de crocodilo”

Descrição: Uma série de fendas interligadas, que têm como origem a fadiga das camadas betuminosas, formando peças de diferentes formas geométricas e angulares. O fendilhamento inicia-se na parte inferior da camada betuminosa onde as tensões e extensões são maiores sob a ação do tráfego rodoviário. As fendas propagam-se até à superfície e inicialmente formam uma série de fendas longitudinais paralelas entre si, com a evolução da anomalia as fendas interligam-se tomando o aspeto de pele de crocodilo, geralmente nas zonas coincidentes com as rodéiras dos veículos.

Quantificação: Metro quadrado

Causa provável: Capacidade de carga insuficiente

Evolução/Consequências: Desagregação dos bordos da fenda

Penetração de água e enfraquecimento das camadas subjacentes

Eventual bombagem

Desprendimento de blocos e formação de ninhos



Fig.2.5 - Fendilhamento tipo “pele de crocodilo” [13]

d) Cavados de rodeiras

Descrição: Depressão na superfície do pavimento localizada na zona coincidente com as rodeiras dos veículos. O pavimento eleva-se ao longo das laterais do cavado de rodeira. Por vezes esta anomalia só é identificada após a ocorrência de um período de precipitação pluviométrica, devido à acumulação de água.

Quantificação: Registrar a máxima profundidade da rodeira em milímetros, através de uma régua rígida de 1,2 m e de uma régua de 20 centímetros graduada em milímetros. Regista-se também em metro quadrado, a área da superfície do pavimento afetada.

Causa provável: Capacidade de carga insuficiente (deformações permanentes no solo e camadas granulares)

Deficiências na formulação ou execução das camadas betuminosas (fluência)

Evolução/Consequências: Perda de conforto

Acumulação de água na superfície



Fig.2.6 - Rodeira [13]

e) Ondulações da superfície (irregularidade longitudinal)

Descrição: Uma série de elevações e depressões, espaçadas entre si de 30 cm, que se distribuem em intervalos regulares, normalmente a menos de 3 metros, ao longo do pavimento. A ondulação é perpendicular ao sentido do tráfego rodoviário.

Quantificação: Metro quadrado

Causa provável: Empolamento (resultante da expansão das argilas)

Assentamentos (consolidação de solos; deficiências de compactação de aterros)

Evolução/Consequências: Perda de conforto

Desgaste dos veículos



Fig.2.7 - Ondulações da superfície [13]

f) Degradações superficiais

Descrição: Deterioração da superfície do pavimento devido à perda de ligante betuminoso, com o consequente desprendimento dos agregados.

Quantificação: Metro quadrado

Causa provável: Tipo de materiais empregues

Formulação das misturas

Deficiência de construção

Evolução/Consequências: Desprendimento de materiais

Formação de ninhos e peladas

Perda de regularidade



Fig.2.8 - Superfície de pavimento degradada [13]



Fig.2.9 - Pelada [13]



Fig.2.10 - Ninho [13]

Após uma Inspeção Visual detalhada, procede-se à caracterização funcional, onde se verificam possíveis irregularidades longitudinais, e transversais, averiguando a variação altimétrica da

superfície; a profundidade da textura do pavimento, caracterizando-se desta as características antiderrapante da superfície; e a avaliação do índice de atrito visando o estudo da aderência entre o pneu e o pavimento.

Finalmente avalia-se a estrutura do pavimento procedendo a ensaios de carga não destrutivos, para medição de deflexão da superfície do pavimento; à medição de espessuras das camadas constituintes do pavimento em avaliação; à identificação de zonas com um comportamento estrutural homogêneo, que correspondem a zonas de diferentes capacidades de carga; a ensaios laboratoriais para a caracterização dos materiais intervenientes nas diferentes camadas; e por último, com base nas informações recolhidas anteriormente, estabelece-se modelos de comportamento estrutural.

Seguindo o processo descrito, tem-se uma noção bem detalhada do grau de degradação do pavimento em análise. Uma vez determinado, é necessário selecionar a ou as técnicas mais indicadas na resolução desse problema [13].

2.7. SELEÇÃO DE TÉCNICAS DE CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO

Geralmente existem muitas opções disponíveis para a recuperação de uma rodovia deteriorada e, às vezes, é difícil determinar qual a melhor. Contudo, duas importantes perguntas devem ser feitas no início para ajudar a selecionar a “correta”, aquela que é mais económica para toda a vida útil da estrada.

As duas perguntas importantes são:

- O que realmente está de errado com o pavimento existente? Uma pesquisa superficial baseando-se numa inspeção visual, juntamente com alguns testes básicos, normalmente será suficiente para poder entender o mecanismo de desgaste. É importante determinar se o desgaste está limitado ao revestimento ou se existe um problema estrutural;
- O que a administração da estrada realmente deseja? Uma expectativa de vida, por exemplo, de 15 anos para o projeto, ou um desembolso maior de capital que retardará o índice atual de deterioração e manterá o pavimento por mais cinco anos?

A resposta a estas duas perguntas reduzirá as opções de recuperação, sobrando assim as mais económicas dentro do contexto da natureza do problema e do período de tempo. Logo a seleção da melhor opção é simplificada.

Outro ponto importante que afeta a decisão é a praticidade dos vários métodos de recuperação. A adaptação do tráfego, as condições climáticas e a disponibilidade de recursos podem ter uma influência significativa na maneira como um projeto é executado, e pode impossibilitar certas opções.

Todo este exercício tem somente um propósito: determinar a solução com melhor custo-benefício para o problema real dentro do contexto do ambiente do projeto [12]. O processo de escolha da técnica mais adequada deverá respeitar essencialmente três fases.

A primeira fase diz respeito à identificação do problema, em que se caracteriza o estado do pavimento, verifica-se possíveis constrangimentos e se define as exigências de desempenho para o pavimento.

O que se pretende ao definir determinadas exigências de desempenho é assegurar que o pavimento terá um desempenho adequado após as obras de conservação e reabilitação, face ao nível de serviço pretendido. Esta definição é realizada em função do tipo da via idealizada (autoestrada, estrada nacional, via urbana, área residencial, entre outros); do tipo e volume de tráfego a que se destina; da velocidade de projeto; das condições geométricas que a via assumirá; e das condições climáticas a que

estará sujeita. As exigências podem ser funcionais, como a aderência, a capacidade de drenagem superficial, a resistência à ação da água, entre outros; e estruturais, como a resistência à deformação permanente, a resistência à fadiga, a resistência à reflexão de fendas, entre outros.

A segunda fase consiste na análise de possíveis soluções do ponto de vista técnico. Nesta fase é necessário perceber quais as técnicas disponíveis, a sua eficiência na resolução do problema e a durabilidade da solução. De seguida apresenta-se algumas técnicas viáveis para conservação e reabilitação de pavimentos com algum tipo de degradação [14].

a) Tratamentos localizados

Este tipo de tratamentos destina-se à resolução de problemas funcionais ou estruturais isolados. Este grupo de tratamentos é utilizado tipicamente em ações de conservação de rotina, ou como complemento a outros tratamentos [14].

b) Tratamentos superficiais

Neste grupo incluem-se os tratamentos aplicados na totalidade da área do pavimento, em espessuras inferiores ou iguais a 40mm. Tipicamente estes tratamentos são adotados quando o objetivo das ações de conservação é a melhoria das características funcionais. São também utilizados como medidas de conservação preventiva [14].

c) Reforço

Este tipo de tratamento destina-se essencialmente à reabilitação dos pavimentos, aumentando a sua capacidade de carga por forma a suportar as ações do tráfego futuro. Neste grupo de tratamentos inclui-se a aplicação de camadas de reforço com espessuras superiores a 40mm [14].

d) Tratamentos de Reconstrução

Neste grupo incluem-se os tratamentos destinados a restituir as condições de serviço de pavimentos que se encontram próximo do estado de ruína estrutural, e dotá-lo de capacidade de carga adequada às ações do tráfego futuro. Neste grupo inclui-se a remoção de camadas existentes nos pavimentos ou a sua reciclagem, envolvendo espessuras significativas [14].

Na tabela 2.1 expõem-se alguns exemplos de tratamento possíveis para a conservação e reabilitação de pavimentos degradados.

Tabela 2.1 - Técnicas de Conservação e Reabilitação disponíveis [14]

	Tratamento	Descrição sumária
Tratamentos Superficiais	Revestimento superficial	Aplicação sucessiva(s) de camadas(s) de ligante betuminoso seguida de camada(s) de gravilha
	Selagem de fendas/juntas	Enchimento de fendas ou juntas com um selante (mástique betuminoso ou outro) para evitar o ingresso da água
	Saneamento localizado	Remoção de materiais deficientes ou em mau estado existentes em áreas localizadas do pavimento e substituição por novos materiais
	Enchimento de ninhos	Enchimento de ninhos, geralmente com misturas betuminosas, precedido de limpeza de materiais soltos
	Camada betuminosa fina (até 40mm) em mistura a quente	Aplicação de camada de desgaste em misturas betuminosa fabricada a quente
	Camada betuminosa fina (até 40mm) em mistura a frio	Aplicação de camada de desgaste em mistura betuminosa fabricada a frio
	Microaglomerado a frio (slurry seal)	Aplicação de camada fina de ligante betuminoso e agregado fino, que é misturado a frio, no local da obra
	Fresagem e substituição da camada de desgaste	Remoção da camada de desgaste e substituição por materiais novos, na mesma espessura
Reforço e Reconstrução	Reforço em mistura betuminosa a quente (> 40mm)	Aplicação de uma ou mais camadas em mistura betuminosa a frio, sobre o pavimento existente
	Reforço em mistura betuminosa a frio (> 40mm)	Aplicação de uma ou mais camadas em mistura betuminosa a frio, sobre o pavimento existente
	Reforço em mistura betuminosa a quente, incorporando geogrelhas, geotêxteis e SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer)	Aplicação de uma ou mais camadas em mistura betuminosa fabricada a quente, combinada com aplicação de medidas antirreflexão de fendas.
	Reciclagem da mistura em central (>40mm)	Remoção de misturas betuminosas existentes, e aplicação de camada de reforço utilizando a mistura reciclada em central, adicionando-lhe materiais novos
	Reciclagem <i>in situ</i> a frio	Fresagem de camadas existentes no pavimento, mistura com materiais novos <i>in situ</i> (agregado e ligante betuminoso e/ou hidráulico) e aplicação.

Na terceira e última fase, seleciona-se a solução final, caracterizando o seu desempenho face às exigências estipuladas, definindo as condições de aplicação em obra, procedendo a uma análise de custo-benefício e finalmente, desenvolve-se o projeto de execução da solução escolhida.

A solução final deverá ser aquela que satisfaça simultaneamente os critérios de eficiência e de durabilidade. Devem-se aplicar soluções/materiais para a camada de desgaste que tenham um bom desempenho face às exigências funcionais, e nas restantes camadas face às exigências estruturais.

A aplicação em obra da solução selecionada está condicionada por determinados critérios como o nível de tráfego existente, condições geométricas, número de vias e largura das bermas, velocidades praticadas na via intervencionada, a necessidade de trabalhar em período noturno e a existência de vias alternativas para desvio de tráfego.

Na avaliação custo-benefício da solução selecionada deve-se rever o orçamento disponível, o custo inicial versus a eficiência e durabilidade pretendida, os custos de conservação de rotina associados à solução, proceder a uma previsão de trabalhos extra que venham a ser necessários, dos custos ambientais e finalmente dos custos para os utentes [14].

2.8. NOVAS SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS BETUMINOSOS

Perante a necessidade de melhorar, reabilitar e conservar as infraestruturas existentes, o projetista responsável deve percorrer todo o processo descrito, desde a verificação do estado de degradação do pavimento até à averiguação das técnicas disponíveis para resolver o problema estabelecido.

Com o tempo, as técnicas de reabilitação e conservação vão se desenvolvendo, em resposta ao surgimento de maiores exigências de qualidade e também ao aumento da consciencialização face às preocupações ambientais, verificando-se assim a aplicação contínua de novos materiais, quer na modificação do ligante ou na substituição dos agregados naturais.

a) Misturas betuminosas de alto módulo

Misturas em que se utiliza como ligante, um betume mais duro do que é habitualmente utilizado nas misturas tradicionais. Consegue-se atingir maiores módulos de deformabilidade, melhores comportamento às deformações permanentes e uma maior viscosidade do betume. No entanto apresenta maiores gastos energéticos e maiores problemas na compactação, sobretudo em tempo frio [15].

b) Misturas com betumes modificados com polímeros

Utiliza-se como ligante, um betume modificado com polímero (termoplástico ou elastómero), conduzindo, em geral a um aumento da viscosidade, à diminuição da penetração, ao aumento da temperatura de amolecimento, a uma melhor resistência ao envelhecimento e a uma melhor adesividade. Estas misturas podem ser aplicadas em camadas de desgaste, proporcionando melhores características funcionais, através de uma melhoria da rugosidade e da aderência, e uma diminuição do ruído de rolamento. Apresentam uma maior durabilidade, menor suscetibilidade e maior flexibilidade. Além disso, exibem melhor comportamento à fadiga e/ou melhores resistências às deformações permanentes.

No entanto, apresentam alguns problemas de manutenção, uma vez que com a passagem do tráfego e sob as ações atmosféricas vai-se dando a colmatação dos poros, até que a mistura apresenta no final, características superficiais semelhantes às de uma mistura rugosa [15].

c) Misturas betuminosas com borracha reciclada

Primeiramente há que ter controlo da homogeneidade micro-estrutural da borracha; há preferência, sobre o emprego da borracha proveniente diretamente da linha de produção de pneus (rejeitados) pois apresentam características homogêneas. O emprego da borracha triturada heterogênea, com diferentes proporções entre a borracha natural e a sintética, resulta em variações significativas nas características finais do betume modificado com borracha [5].

Este tipo de misturas pode ser produzida a seco, caso em que a borracha é adicionada juntamente com os agregados, ou por uma via húmida, em que o betume é previamente modificado com a borracha reciclada de pneus, antes deste se misturar com os agregados [15].

No processo de digestão da borracha finamente moída no betume, devem ser adicionados óleos aromáticos de maltenos (saturados) que atuem sobre as partículas de borracha, para auxílio da digestão do material. Tal procedimento é de extrema importância, pois se não se introduzirem os óleos extensores, a borracha consumirá os aromáticos dos maltenos disponíveis no betume, que necessariamente deverão ser repostos. A viscosidade da mistura, sem a adição de óleo extensor, poderá subir além do aceitável. Esses óleos extensores, ricos em maltenos, são aplicados em taxas de 5% a 20% do peso do betume na mistura com borracha.

Quando se aplica uma taxa igual ou inferior a 15% de borracha no ligante, é possível armazenar o produto, geralmente empregue em misturas betuminosas densas. Betumes modificados na faixa de 18% a 25% de borracha apresentam elevada viscosidade e são preferencialmente empregados na confecção de misturas betuminosas abertas ou descontínuas [5].

As misturas betuminosas com borracha reciclada de pneus permitem atingir uma melhor resistência à fadiga e à propagação de fissuras. Tal deve-se à diminuição da espessura total de reforço do pavimento, desde que o dimensionamento não seja condicionado por deficiências no suporte da estrutura do pavimento. A adição deste componente permite também uma maior resistência ao envelhecimento das camadas de desgaste e melhoria das características superficiais incluindo a diminuição do ruído de rolamento [15].

d) Misturas com agregado reciclado de Resíduos de Construção e Demolição

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são resíduos provenientes de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação e demolição e da derrocada de edificações.

Estima-se que os países da união europeia produzam cerca de 850 milhões de toneladas por ano de RCD, o que representa, aproximadamente, 31% do total de resíduos gerados. Perante valores tão elevados, os RCD são submetidos a análises e pesquisas visando verificar a sua aplicabilidade em diferentes áreas, como a engenharia civil. Um leque variado de materiais podem ser incluídos neste tipo de resíduos, como o betão, tijolos, madeira, vidro, metais, plásticos, gesso, mosaicos, cerâmicas, entre outros.

Os RCD são submetidos a processos de britagem e separação em frações ou em centrais de reciclagem fixas, sendo para tal necessário proceder ao transporte dos detritos, ou no próprio local da demolição,

utilizando centrais móveis. Separam-se os resíduos logo de início, evitando a limitação das potencialidades dos detritos reciclados resultante da sua contaminação por outros materiais. Os detritos que interessam para a produção de agregados reciclados são as alvenarias e respectivas argamassas e os betões, separadamente ou com diferentes níveis de mistura [30].

Os agregados provenientes da construção civil e de demolição (RCD) podem ser classificados segundo a sua cor predominante, por exemplo, cinza (visualmente predominante de componentes de construção de natureza cimentícia) e vermelha (visualmente predominante de componentes de construção de natureza cerâmica).

O uso de agregados RCD é uma alternativa viável para pavimentação, como material granular para camadas de reforço, sub-base e base de pavimentos (em geral de baixo custo) bem como para a confecção de camadas de betão compactadas com rolo. Possuem, em função da sua origem, elevada porosidade, bem como um determinado grau de heterogeneidade variável que influencia na qualidade final do produto como material de pavimentação.

A maior presença de resíduos de materiais cerâmicos confere aos RCD maior porosidade, além de uma coloração mais avermelhada. Além disso, trata-se geralmente de grão mais frágeis, que, durante o processo de compactação por rolos, tendem a apresentar quebra e desagregação granulométrica. Por outro lado, tal processo pode resultar em misturas com maior quantidade de finos, o que poderá até mesmo afetar favoravelmente o travamento do material, garantindo-lhe resistência. Além disso, uma grande presença de resíduos de origem cerâmica no material pode conferir-lhe certa hidraulicidade ou pozzolanicidade, verificando-se um ganho da resistência do material após compactação, mesmo sem a presença de ligantes hidráulicos novos.

A porosidade do RCD poderá causar acréscimos substanciais na quantidade de água (teor de água ótimo) para a mistura e aplicação do material. Tal facto poderá resultar em variações nas resistências de camadas de betão compactadas com rolo elaboradas com tais materiais, exigindo eventualmente aumentos no consumo de cimento [5].

e) Técnicas antirreflexão de fendas com interface anti-fissuras

A colocação de uma camada de reforço sobre uma camada existente envelhecida é uma solução viável, embora apenas a curto prazo. A camada de reforço está exposta às ações ambientais, recebe as cargas devidas ao tráfego, e irá no futuro reagir a estas solicitações. Perante a presença de fendas antigas nas camadas betuminosas antigas, verificar-se-á a sua reflexão até à camada de reforço, gerando-se assim uma continuidade desde o início da fenda, em profundidade, até à superfície.

Uma forma de protelar essa reflexão é a colocação de uma interface anti-fissuras posicionada sobre as camadas betuminosas antigas e sob a camada de reforço. Podem-se utilizar geotêxtil impregnado com emulsão ou ainda uma grelha metálica com Slurry Seal (lama betuminosa). Esta aplicação dispensa a fresagem das camadas fendilhadas uma vez que é sobre ela que se faz a interface, resultando assim numa redução dos volumes de vazadoiro [15].

3

FRESAGEM DE PAVIMENTOS BETUMINOSOS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A fresagem é uma técnica relativamente nova na recuperação, manutenção e reabilitação de pavimentos. A fresagem é nos dias atuais uma técnica constantemente aplicada como parte do processo de restauração de pavimentos deteriorados. Esta técnica consiste especificamente na remoção da camada de desgaste, a camada superficial de um pavimento betuminoso.

A fresagem é também utilizada em ações de aplicação de reforço ou de reconstrução total do pavimento através de processos de reciclagem. Nestes casos a fresagem atinge profundidades mais profundas.

A primeira metodologia de remoção de material de pavimentos degradados, visando restaurar as condições de traficabilidade das vias a níveis satisfatórios, compreendia a escarificação desses pavimentos, processo no qual a superfície era aquecida até à temperatura suficiente para a sua extração. A utilização deste tipo de metodologia tornava difícil extrair uma espessura pré-determinada em projeto, uma vez que geralmente consistia na remoção de toda a camada betuminosa, arrancando o material com dentes ou ponteiras. Daqui resultavam fragmentos muito grandes, o que exigia o seu transporte até centros de britagem de material granular, para serem utilizados na construção.

Apenas quando a indústria de equipamentos experimentou um importante desenvolvimento, é que se verificou o aparecimento de máquinas de grande porte desenhadas para garantir o desbaste do pavimento em profundidades pré-determinadas [16].

Em 1970 surgiu a fresagem a quente. Grandes queimadores a gás anexados a máquinas fresadoras, com mais de 20 toneladas e 16 metros, aqueciam o pavimento removendo-o com cilindros fresadores. Pela primeira vez, a superfície das estradas podia ser economicamente reparada sem precisar de intervir em toda a camada do pavimento e sem danificar o material que se encontrava por baixo. A fresagem a quente era considerada o método padrão na construção rodoviária, mas devido aos custos envolvidos, à geração de uma quantidade significativa de fumos tóxicos e à pouca profundidade que conseguia atingir, a utilização deste método foi sempre constringida por tais características.

As primeiras máquinas de fresagem a frio foram desenvolvidas na Europa. A metodologia foi iniciada com a utilização de ferramentas de carbono, oriundas da indústria mineira, na fresagem de superfícies de estrada. Tal situação tornou desnecessário o aquecimento do pavimento. Mais tarde surgiram picaretas de carbono rotativas que permitiram ações de remoção mais complexas, até profundidades maiores do que as primeiras ferramentas.

Posteriormente surgiram as primeiras máquinas com peças frontais de carregamento de material. Esta logística revolucionária permitiu um carregamento mais eficiente de caminhões com material fresado.

Com o tempo, o uso de tratores sobre lagartas aumentou, principalmente em superfícies que não suportavam o peso de tratores convencionais. O desenvolvimento dos cilindros fresadores aumentou a produtividade diária das ações de fresagem rodoviária.

Nos anos 90 introduziram-se os primeiros sistemas de ferramentas substituíveis. As ferramentas com indícios de desgaste passaram a ser facilmente substituídas na própria obra, uma vez que estão acopladas ao trator por simples parafusos.

Mais tarde, o desenvolvimento de sistemas de alta precisão garantiu profundidades exatas de fresagem e fresagem de superfícies.

Esta evolução, levada a cabo por pesquisadores e pela indústria, possibilita que o mercado atual tenha capacidade para oferecer uma geração de máquinas de alto padrão o que permite que as obras rodoviárias alcancem um novo nível de produtividade, eficiência de custos e qualidade de execução [17].

3.2. APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE FRESAGEM NA REABILITAÇÃO

A introdução da técnica e do equipamento de fresagem como primeira etapa das várias metodologias de reabilitação de pavimentos, veio fomentar um crescimento exponencial na eficiência do processo e eficácia do seu resultado. A fresagem apresenta-se com uma técnica notoriamente flexível no que diz respeito à sua aplicabilidade, uma vez que pode ser utilizada tanto em intervenções localizadas, como em toda a extensão da via; proporciona dimensões e profundidades de corte variáveis, pois permite alcançar desde profundidades de 2,5 cm até profundidades de 35 cm [17]. Esta flexibilidade deve-se muito à tecnologia desenvolvida nomeadamente em relação aos equipamentos de fresagem e seus componentes. A aplicação da técnica de fresagem deve ser portanto adequada à solução de problemas específicos, tais funcionais, proporcionando conforto e segurança aos utentes, como estruturais, de forma a prolongar a vida útil do pavimento.

Nos grandes centros urbanos, onde o horário disponível para a conservação e manutenção da malha viária é restrito, a técnica da fresagem tem-se mostrado muito eficaz, minimizando o tempo de intervenção e os consequentes transtornos à população.

O material resultante da fresagem, pelas suas características nobres, pode ser reciclado em central, tanto a quente como a frio, podendo ser armazenado em locais apropriados, e aplicado em camadas de desgaste, e na execução de camadas base e sub-base, o que reduz os custos desses serviços, além de minimizar a exploração de novas jazidas.

Outra forma de reaproveitamento de materiais betuminosos que se tem mostrado bastante viável, é a reciclagem *in situ* a frio justamente pela ausência de transporte dos materiais.

A grande dificuldade encontrada neste processo executivo refere-se à granulometria resultante da operação de fresagem, pois neste método todo o material é reciclado na própria via e é inerente ao aparecimento de fragmentos de pavimentos de tamanhos indesejados para a mistura, os denominados grumos [16].

Grumos

Entenda-se por grumos as partículas que resultam da fresagem de pavimentos envelhecidos constituídas de um ou mais agregados, envoltas por material fino e por betume.

Na reciclagem a quente, em função do pré-aquecimento realizado na superfície do pavimento antes da fresagem, os grumos são praticamente dissolvidos e incorporados na nova mistura juntamente com o material proveniente da central.

Nos métodos de reciclagem realizados em central, tanto a quente como a frio, os grumos de tamanhos indesejados podem ser eliminados preliminarmente por peneiração.

Nos métodos de reciclagem *in situ* a frio, os grumos são apontados como o maior problema [16].

Os grumos não consistem numa só partícula de agregado mas num aglomerado de pequenos agregados colados pelo betume. Diferenciam-se as partículas de agregado reciclado inativas, ou negro com menos de 18 mm de ligante penetrado, das partículas de agregado reciclado ativas com penetração do ligante superior a 25 mm [18]. No entanto esta classificação é apenas válida para a reciclagem a frio à temperatura ambiente e não para reciclagem com altas temperaturas.

As partículas de agregado reciclado inativas revestidas com ligante envelhecido comportam-se de forma similar aos agregados virgens, porque apenas o filme de ligante envelhecido que se encontra até uma profundidade de 0,1-0,3 mm é que se misturará com o novo ligante [19]. As Partículas de agregado reciclado ativas são mais macias e tendem a partir-se mais facilmente quando sujeitas às forças inerentes à mistura e compactação. Portanto, os requisitos referentes às propriedades do agregado da reciclagem a frio são menos exigentes em comparação à reciclagem a quente, para a qual as propriedades angulares do agregado mineral são muito importantes. No entanto, informação relativa a curvas granulométricas e à forma e angularidade da construção original está geralmente disponível, e são analisadas antes da destruição do pavimento existente [20].

A Fig.3.1 pretende demonstrar a dificuldade em determinar a composição exata de um grumo apenas pelo aspeto visual. Da esquerda para a direita a figura mostra em primeiro lugar o grumo visto pelo seu exterior, depois apresenta possíveis secções transversais desse grumo. Pode ser constituído por apenas um agregado revestido, ou por dois grandes agregados com algum betume, e finalmente por um aglomerado de pequenas partículas de agregado e betume [21].



Fig.3.1 – Possíveis composições de um grumo resultante da fresagem a frio [21]

3.3. CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE FRESAGEM

3.3.1. FRESAGEM SUPERFICIAL

A fresagem superficial, também chamada fresagem de regularização, é aquela destinada apenas à correção de defeitos existentes na superfície do pavimento.

Sendo assim, é dispensável a posterior reposição da capa da via, uma vez que a textura obtida permite a circulação de forma segura, porém, não muito confortável, excetuando-se em pontos específicos onde a desgastagem do revestimento remanescente acarrete a formação de buracos.

A maioria das operações de fresagem melhora a textura da superfície da estrada (macrotextura) e da superfície exposta do agregado (microtextura).

Da mesma forma, defeitos do tipo exsudação e deformações plásticas são tratados com o emprego dessa técnica para melhorar as condições de traficabilidade [16].

3.3.2. FRESAGEM RASA

A fresagem rasa atinge normalmente as camadas superiores do pavimento, podendo chegar em alguns casos, à camada de ligação. Na maioria dos serviços, este tipo de intervenção apresenta uma profundidade média de corte em torno de 5 cm.

Este procedimento é utilizado na correção de defeitos funcionais e em remendos superficiais. É aplicado, principalmente, em vias urbanas, onde se deseja manter o perfil do pavimento com relação aos dispositivos de drenagem superficial e obras de arte corrente.

A textura resultante da fresagem aumenta a ligação ou a resistência ao cisalhamento entre o antigo revestimento e a camada de revestimento [16].

3.3.3. FRESAGEM PROFUNDA

A fresagem profunda é aquela em que o corte atinge níveis consideráveis, podendo alcançar, além da camada de revestimento, as camadas de base e até de sub-base do pavimento.

Este é um procedimento geralmente utilizado em intervenções visando o aspeto estrutural, seja por recomposição da estrutura do pavimento, ou mesmo por reciclagem e incorporação do revestimento à base.

Já ensejando o aspeto funcional, principalmente visando a segurança e o restabelecimento das condições “ideais” de atuação dos dispositivos de drenagem superficial, utiliza-se esta técnica para corrigir o perfil original das vias.

É um procedimento também muito indicado na execução de serviços de eliminação da degradação superficial exposta sob a forma de ninhos e peladas [16].

3.4. APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE FRESAGEM EM PAVIMENTOS BETUMINOSOS

Dependendo da situação em obra, a técnica de fresagem é aplicada de forma específica, isto é, para a resolução de um determinado problema, como os apresentados de seguida.

3.4.1. FRESAGEM PARA CORREÇÃO DE DEFEITOS SUPERFICIAIS

Esta técnica é utilizada para correção de defeitos encontrados na superfície dos revestimentos, não se limitando à fresagem superficial empregada na correção de deformações plásticas, exsudações, entre outras.

Em locais com exsudação, realiza-se a fresagem superficial, visando restaurar a aderência pneu-pavimento para proporcionar maior conforto e segurança aos utentes.

Em locais com deformações, realiza-se a regularização da via determinando-se, com o auxílio de uma régua apoiada sobre o pavimento, as áreas de intervenção. Tal procedimento é adotado para melhorar as condições de traficabilidade [16].

3.4.2 FRESAGEM DE ÁREAS DESCONTÍNUAS

Esta aplicação consiste na execução da fresagem de áreas descontínuas, com variações de comprimento e largura e, por vezes, atingindo a largura total de uma ou mais vias de circulação. Na maior parte das vezes, esta aplicação acontece nas vias mais solicitadas.

Nos casos em que a fresagem não atinge a largura total da faixa, deve-se observar o aparecimento de degrau longitudinal no pavimento enquanto não se executa a camada superficial.

Degraus que resultem de espessuras de corte delgadas são toleráveis por um período reduzido; porém, nos casos de profundidades maiores, estes podem colocar em risco a vida dos utentes, principalmente dos condutores de motocicletas.

Quando se trata de fresagem profunda, a passagem de tráfego deve ser interditado, pelo menos até a colocação das camadas inferiores, como forma de diminuir o degrau.

Tratando-se de áreas menores, como uma operação de eliminação de peladas ou de ninhos, os equipamentos de fresagem de pequeno porte têm-se mostrado muito versáteis, aumentando a capacidade produtiva comparativamente ao enquadramento executado por martelos pneumáticos. A Fig.3.2 apresenta esquematicamente em planta, algumas ocorrências pontuais de um pavimento, com posterior restauro das mesmas [16].

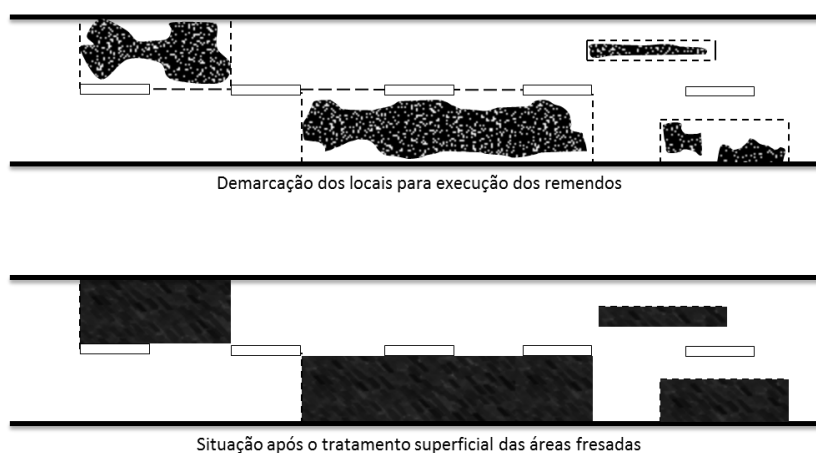


Fig.3.2 – Intervenções em áreas descontínuas

3.4.3 FRESAGEM CONTÍNUA DE TODA A FAIXA

Esta aplicação consiste na execução da fresagem na largura total da via, nas espessuras de corte determinadas em projeto.

Tal procedimento é utilizado em locais onde se deseja manter as cotas do perfil, apesar do posterior tratamento superficial, solucionar problemas de pavimentos muito oxidados ou que apresentam um desgaste superficial, atenuar os efeitos de reflexões do fissuramento do pavimento remanescente à

nova camada betuminosa; e até mesmo solucionar outros defeitos na camada de revestimento betuminoso, como exsudações e deformações plásticas.

A fresagem de toda a faixa é utilizada também para aliviar o peso sobre pontes e viadutos, com tratamentos superficiais sem a retirada da camada dos revestimentos anteriores, e na restauração da altura original dentro de túneis. A Fig.3.3 apresenta a fresagem para remoção do revestimento betuminoso, na largura total da pista, para posterior tratamento superficial [16].

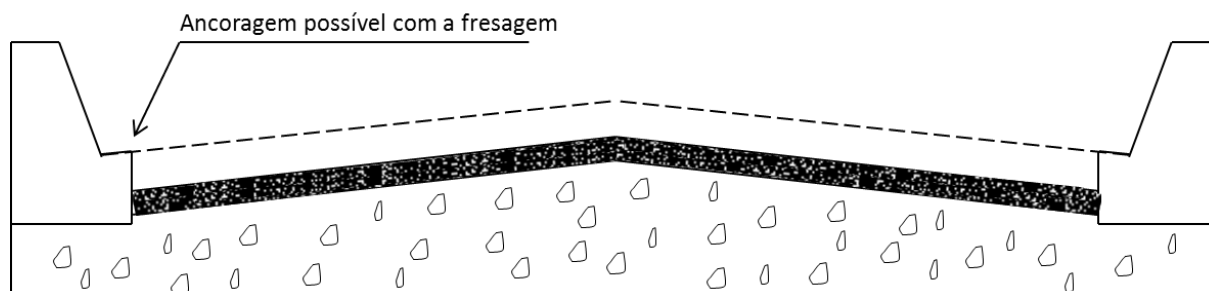


Fig.3.3 – Fresagem contínua de toda a faixa de rodagem

3.4.4. FRESAGEM EM CUNHA

A fresagem em cunha, conhecida também como fresagem de “garra”, é executada somente nas bordas da faixa, junto às sargetas, inclinando-se o cilindro fresador para o lado desejado, com o intuito de promover a ancoragem da nova camada de revestimento.

Na Fig.3.4 apresenta-se a uma correta execução da fresagem em cunha com posterior tratamento com a aplicação de uma nova camada de revestimento [16].

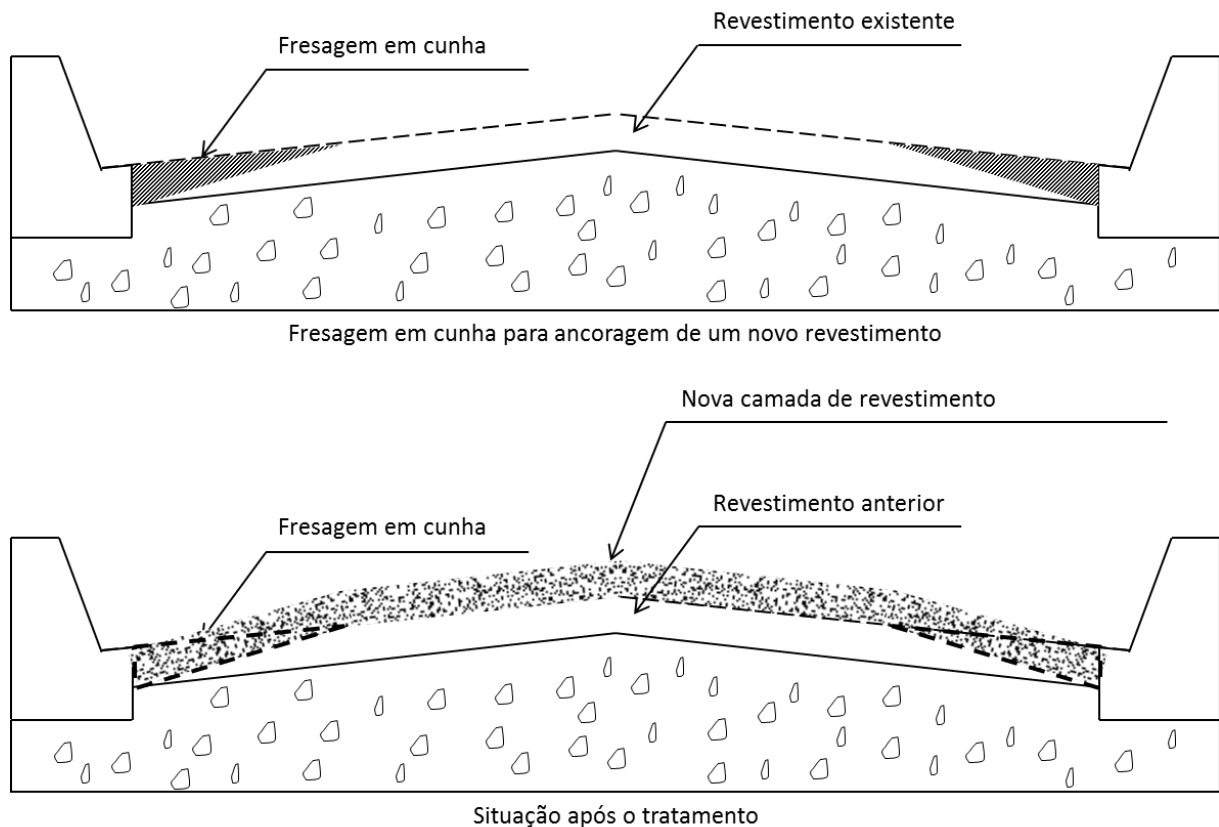


Fig.3.4 – Execução de fresagem em cunha e situação após tratamento

3.4.5. FRESAGEM PARA CORREÇÃO DA INCLINAÇÃO DO PAVIMENTO

Consiste na aplicação da fresagem com o intuito de corrigir ou alterar a inclinação do pavimento existente, seja longitudinalmente ou transversalmente.

Geralmente os locais e espessuras de corte são determinadas com o auxílio de levantamento topográfico e de acordo com o projeto.

Esta aplicação é muito frequente em projetos de duplicação de estradas, nos quais a fresagem do pavimento pode levar a uma economia nos custos da obra, tendo em conta as correções geométricas necessárias para tal [16].

3.4.6. FRESAGEM SUPERFICIAL PARA SONORIZAÇÃO

Trata-se de uma fresagem superficial e descontínua, com profundidade de corte de aproximadamente 1 cm, executada ao longo das bermas e áreas de refúgio e das bermas das vias.

A superfície fresada servirá de alerta aos utentes quando o veículo sair para fora dos limites das faixas de circulação, sem consequências face à segurança dos condutores [16].

3.4.7. FRESAGEM DE REMATE

Esta aplicação consiste em executar a fresagem do pavimento junto às diversas interferências existentes no mesmo, como tampas de saneamento ou sarjetas, como exemplificado na Fig.3.5 [16].



Fig.3.5 – Execução da fresagem de remates [22]

3.5. VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE FRESAGEM

3.5.1. MANUTENÇÃO DO PERFIL DO PAVIMENTO

A fresagem de uma dada espessura de revestimento definida em projeto possibilita a remoção do material degradado para posterior deposição de um novo material, sem alteração das cotas do pavimento, verificando-se a melhoria estrutural e funcional do mesmo.

Sucessivos tratamentos superficiais, sem a extração do revestimento existente, podem provocar problemas de ordem estética, funcional e de segurança.

Um dos problemas de ordem funcional decorre da modificação da secção transversal o que geralmente resulta em problemas de escoamento das águas pluviais, muitas vezes com o afogamento das sarjetas e deformação das sucessivas camadas de revestimento aplicadas sobre as valetas, diminuindo a capacidade de drenagem das mesmas. A diminuição da altura sob pontes, viadutos e dentro de túneis, constitui um problema funcional grave.

A alteração da secção transversal do pavimento também afeta a segurança dos condutores, em função da inclinação excessiva da pista, e do facto dos utentes ficarem muito expostos a acidentes decorrentes da diminuição do espelho das guias cuja finalidade é separar justamente a via do passeio [16].

3.5.2. MANUTENÇÃO DO NIVELAMENTO NOS TRATAMENTOS LOCALIZADOS

Anteriormente à introdução dos equipamentos de fresagem, em situações de reconstrução da camada superficial de vias exclusivas ou de pequenas áreas, era usual aplicar uma nova camada betuminosa sobre a existente, o que ocasionava um desnível. Apesar da correção ser executada com a fração mais fina do material betuminoso, o desnível é inerente ao procedimento. Tal situação é acompanhada pela desagregação do material em alguns pontos destas reparações. Este desnível causa desconforto aos usuários e provoca possíveis deformações na nova camada de revestimento [16].

3.5.3. MANUTENÇÃO DO NÍVEL JUNTO A DESCONTINUIDADES DO PAVIMENTO

As vias urbanas apresentam algumas descontinuidades no pavimento inerentes aos serviços públicos de abastecimento de água ou de energia. Essas descontinuidades situam-se sobre as diversas galerias pertencentes à rede de águas, energia, telefones, entre outros, deixando expostos as respectivas tampas.

A aplicação de um revestimento da via sem a fresagem do pavimento causa o desnivelamento entre o novo revestimento e a descontinuidade. Esta situação causa desconforto e insegurança à circulação, o que pode provocar acidentes graves ou até mesmo, danificar o património do utente [16].

3.5.4. CORREÇÃO DE DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS

Particularmente nos corredores de autocarros e em curvas de pequeno raio e em rotundas, a fresagem pode permitir a correção das deformações plásticas existentes non revestimentos [16].

3.6. PROBLEMAS DECORRENTES DA FRESAGEM DE PAVIMENTOS

Soluções adotadas sem base num projeto criterioso podem levar à ocorrência de imprevistos que geralmente acarretam custos extraordinários ou ainda ao insucesso da solução adotada. Dependendo da proporção do problema, pode ser necessário a paralisação dos serviços ou do tráfego por determinado período.

3.6.1. DEGRAU NA VIA

O degrau na via pode ser considerado como o mais grave dos problemas causados pela fresagem, e dependendo da profundidade de corte, pode exigir o isolamento total da área.

Existem dois tipos de degraus, o longitudinal e o transversal. No caso do degrau longitudinal, realizado apenas nas vias de circulação, para espessuras delgadas a solução passa por sinalizar a obra de maneira adequada de forma a orientar os utentes. No entanto, na fresagem de grandes profundidades, o troço deve ser necessariamente interditado ao tráfego.

No caso do degrau transversal, a solução é realizar a fresagem e fazer uma rampa no início e no final do corte, procedendo ao acabamento posteriormente [16].

3.6.2. APARECIMENTO DE BURACOS

A fresagem pode fomentar o aparecimento de buracos na via, em virtude da desestruturação do pavimento remanescente em alguns pontos onde a espessura de corte atinge as camadas inferiores do mesmo, ou quando a espessura de revestimento é inferior à de fresagem. É comum também aparecer este tipo de problema onde o pavimento se apresenta muito fissurado.

Nos locais de desagregação, anteriormente à abertura da via ao tráfego, deve-se realizar a correção com material betuminoso, tapando-se desta forma os buracos. Este procedimento impede a propagação dos mesmos, além de abrandar o processo destrutivo causado pela infiltração de águas nas camadas inferiores do pavimento [16].

3.6.3. DESCOLAGEM DE “PLACAS” DO REVESTIMENTO BETUMINOSO

É comum acontecer o descolamento de “placas” no interior de áreas fresadas, principalmente quando da abertura da via ao tráfego, nos casos em que a fresagem atinge quase a totalidade da espessura da camada do revestimento existente.

A solução é conhecer a estrutura do pavimento e definir, no projeto de restauro, a espessura de fresagem, e assim evitar deixar na via uma espessura muito delgada do revestimento, da ordem de 5 a 10 mm, origem do problema [16].

4

TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

4.1. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS BETUMINOSOS: EVOLUÇÃO HISTÓRICA

Durante décadas, os responsáveis pela pavimentação têm testado diversos métodos e equipamentos de restauro e conservação rodoviária, procurando a melhor maneira de utilizar o agregado e o betume presentes nos pavimentos betuminosos deteriorados. Um dos métodos mais promissores é a reciclagem de pavimentos, para a qual há uma variedade de equipamentos e processos consagrados. Estudos do Banco Mundial têm demonstrado que a reciclagem de pavimentos betuminosos é particularmente eficiente em termos de custo, quando realizada antes da deterioração extrema do pavimento.

A reciclagem de pavimentos tem-se mostrado um bom caminho não apenas pela rapidez executiva, mas também numa perspectiva de preservação ambiental.

A técnica de reciclagem de revestimentos betuminosos traz vantagens em relação ao meio ambiente, pois faz uso total ou parcial dos materiais do pavimento existente. Também diminui a quantidade de resíduos gerados pelo método tradicional de recuperação rodoviária, que em geral consiste na aplicação de uma nova camada betuminosa [9].

O reaproveitamento de resíduos de construção já é praticado há muito tempo, pois os romanos já empregavam tijolos, telhas e louça cerâmica moída nas suas construções [23].

A reciclagem de pavimentos betuminosos não é um conceito particularmente recente. A reciclagem/reabilitação a frio de estradas com revestimentos betuminosos remota ao início dos anos 1900. O primeiro documento que referencia a reciclagem de pavimentos betuminosos, na forma de reciclagem *in situ* a quente, surge na literatura de 1930 [22].

Historicamente foram as grandes catástrofes, como terremotos e guerras, que impulsionaram a prática do uso de material reciclado [24]. Tem-se como exemplo o que aconteceu após a II Guerra Mundial, onde a Europa, particularmente a Alemanha, teve que enfrentar milhões de toneladas de resíduos remanescentes deste episódio e ainda a grande procura por materiais para serem utilizados na reedificação das cidades. Nesta época, o governo alemão decretou ser prioridade a reconstrução da infraestrutura de transportes, e o país tornou-se pioneiro na reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de materiais de pavimentação.

O desenvolvimento ocorrido nas últimas décadas também impulsionou a separação e utilização deste material. Houve um incremento da quantidade de resíduos de construção gerada na Europa e nos

Estados Unidos. Durante os anos 70 e 80 surgiu o interesse pela reciclagem como forma de controlar este aumento [25].

Foi nos anos 70 que ocorreu o grande impulsionamento das técnicas associadas à reciclagem. Ocorreram dois eventos que estimularam o interesse pela reciclagem de pavimentos betuminosos que se estende até hoje. A crise de petróleo que ocorreu nos inícios dos anos 70 e o desenvolvimento e introdução no mercado em grande escala, em 1975, de equipamento de fresagem a frio, bastante completo com ferramentas de fresagem de carboneto de tungstênio facilmente substituíveis. Desde então que a indústria de equipamento para construção tem-se mostrado proactivo no desenvolvimento de métodos e tecnologias de reciclagem de pavimentos betuminosos, verificando-se um avanço exponencial nos últimos 25 anos [22].

No final dos anos 80, aterrar os resíduos de construção nos países desenvolvidos deixou de ser economicamente atrativo para o poder público, uma vez que o custo da deposição chegou a alcançar mais de US\$100 por tonelada [25]. Além disso, a escassez de áreas para a implantação de novos aterros também contribui para o interesse na reciclagem [26]. A produção de materiais fresados provenientes de aberturas de valas e reabilitação de vias públicas, principalmente nos grandes centros urbanos, atingiu níveis consideráveis. A grande produção de material fresado exigiu assim uma solução alternativa para o seu destino final [5].

A sociedade tornou-se cada vez mais consciente dos efeitos de todo o tipo de desenvolvimentos no ambiente. Muitos países já dispõem de legislação que exige que uma determinada percentagem de material, particularmente aquele que é utilizado na construção e reabilitação de estradas, tem de ser reciclado ou incluir material reciclado. A reciclagem de pavimentos betuminosos é então defendida por esta sociedade de responsabilidade ambiental por demonstrar variabilidade técnica, por permitir a poupança de energia e de fontes não renováveis (jazidas de petróleo e de agregado natural) e por diminuir os custos associados a este tipo de tecnologia [22].

Todos os planos de recuperação do pavimento são específicos de cada projeto. Deve-se ter em mente que, cada projeto é único; a profundidade da reciclagem e o tipo de estabilização são ditados pelo tráfego previsto ao longo do período do projeto, pelos materiais de pavimentação existentes e pela resistência da fundação *in situ* [12].

4.2. MÉTODOS DE RECICLAGEM COM RAP

Perante a necessidade de reabilitação de um pavimento envelhecido, o próprio pavimento pode ser utilizado como fonte de matéria-prima. A utilização do material fresado do pavimento existente surge como uma técnica bastante eficiente e uma alternativa viável à utilização de agregado natural ou proveniente de outras fontes.

Combinando fatores como a localização dos trabalhos, o ligante utilizado e a temperatura de fabrico surge uma extensa lista de diferentes técnicas possíveis de aplicar na reabilitação da estrada com a reciclagem do pavimento envelhecido.

A reciclagem de materiais fresados pode ser realizada em central ou *in situ*. No primeiro caso, o material fresado tem de ser transportado até à central para aí ser misturado de acordo com o projeto de mistura; no segundo, o processo de reciclagem acontece logo após a fresagem do pavimento envelhecido e a mistura da nova camada e reconstrução do pavimento são feitos quase simultaneamente.

O projeto de mistura deve ser definido tendo em conta as características próprias da obra, e o ligante escolhido deve apresentar características que permitam atingir o comportamento mecânico pretendido. O betume, a emulsão betuminosa, o cimento, entre outros, são ligantes eficientes e disponíveis para a estabilização das camadas recicladas. De acordo com o ligante escolhido, deve-se proceder à reciclagem utilizando temperaturas adequadas. O processo de mistura pode ser feito a quente, a frio (temperatura ambiente, ou pode ser um procedimento semi-quente [15].

4.2.1. RECICLAGEM A QUENTE EM CENTRAL – CENTRAIS E PROCESSOS DE FABRICO

O tratamento em central é sempre uma opção a ser considerada quando a reciclagem for aplicável, particularmente para aquelas que exigem uma mistura de materiais reciclados e de materiais virgens a serem tratados, e especialmente ao tratar com espuma de betume, armazenada para utilização posterior.

Depois de se remover as camadas betuminosas existentes, as matérias fresadas são armazenados junto à central onde se procede ao fabrico da mistura. Além de se incluir os materiais fresados de pavimentos antigos e degradados, também se junta o betume novo e, possivelmente, agregados naturais numa perspectiva de controlo granulométrico [15].

São utilizadas centrais de fabrico semelhantes às centrais “fixas” utilizadas para fabrico das misturas betuminosas a quente convencionais, sendo, no entanto necessário introduzir algumas modificações às referidas centrais por forma a adaptá-las para esse efeito. No caso das centrais contínuas procede-se à incorporação de 10 a 50% de material a reciclar; já nas centrais descontínuas, incorpora-se de 10 a 70% de material fresado. A percentagem de material fresado depende do processo adotado para o seu aquecimento. As limitações à quantidade de material fresado a reciclar, prende-se, fundamentalmente, com o facto de este ser um material constituído por agregados e betume envelhecido, que requer cuidados especiais durante o seu aquecimento, nomeadamente em relação à temperatura utilizada [15].

Os benefícios que resultam da mistura em central passam, por exemplo, pela possibilidade de utilizar materiais provenientes de outras obras [15]. Pode-se também referir o maior controlo dos materiais de entrada. Numa central os materiais que chegam podem ser armazenados e testados antes da mistura, e as proporções de entrada podem ser modificadas conforme necessário. A qualidade da mistura pode ser potencialmente melhor. Várias modificações podem ser feitas na operação de mistura como variar o tempo em que o material é retido dentro da câmara misturadora e, assim, modificar a qualidade da mistura. As centrais apresentam maior capacidade de armazenamento. Particularmente com material tratado com espuma de betume, o produto misturado pode ser colocado em armazém, e utilizado quando necessário [12].

Há também a possibilidade de usar equipamentos e métodos construtivos tradicionais, com pequenas modificações.

A reciclagem em central está sempre associada a uma distância de transporte do material desde o local de onde foi extraído até à central, e desta até ao local onde, a mistura em que foi incorporado, será aplicada. Portanto será importante verificar a viabilidade económica deste tipo de solução em função dessa distância de transporte.

Quando o material retirado de pavimentos antigos é armazenado junto à central, tal deve ser feito com o cuidado de separar o esse material consoante a sua providência, ou seja, devem ser separados por lotes, por exemplo, tendo em conta que provieram de diferentes tipos de camadas betuminosas [31].

4.2.1.1. Centrais Contínuas

Nas centrais contínuas, de tambor secador misturador, denominado de alimentação separada, as misturas betuminosas a reciclar são, após processamento, introduzidas na zona central do tambor [9], onde estão protegidas da chama do queimador, demonstrado no pormenor da Fig.4.1 [8]. Nesta situação o aquecimento e a desidratação das misturas betuminosas fresadas são provocados quer pelos gases de combustão quentes, quer pelo contacto com os agregados sobreaquecidos a incorporar na mistura betuminosa [15].

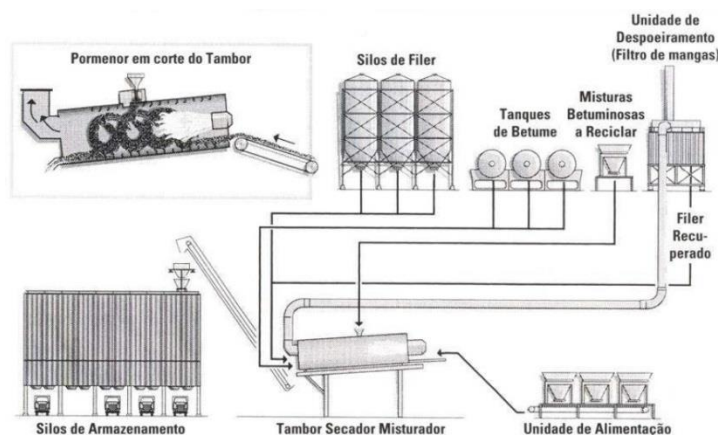


Fig.4.1 – Central Betuminosa Contínua [15]

4.2.1.2. Centrais Descontínuas

Nas centrais descontínuas, a forma mais simples de proceder será introduzir as misturas betuminosas a reciclar diretamente no misturador com a incorporação de cerca de 10 a 30% de material a reciclar. Esta percentagem depende do teor de água dos materiais a reciclar, da qualidade da mistura betuminosa fresada, em relação à especificação imposta para a nova mistura betuminosa, das limitações técnicas do processo em virtude das temperaturas máximas permitidas. Note-se que o aquecimento e desidratação das misturas betuminosas fresadas, para este caso, fazem-se na altura da descarga do secador para o elevador de agregados quentes [31], através do contacto com os agregados sobreaquecidos a incorporar nas misturas betuminosa. Neste caso o RAP é introduzido frio no processo [15]. No misturador é adicionado à mistura a quantidade adequada de betume novo, de acordo com as propriedades pretendidas para as misturas betuminosa [31]. Uma central deste tipo pode ser representada pela Fig.4.2.

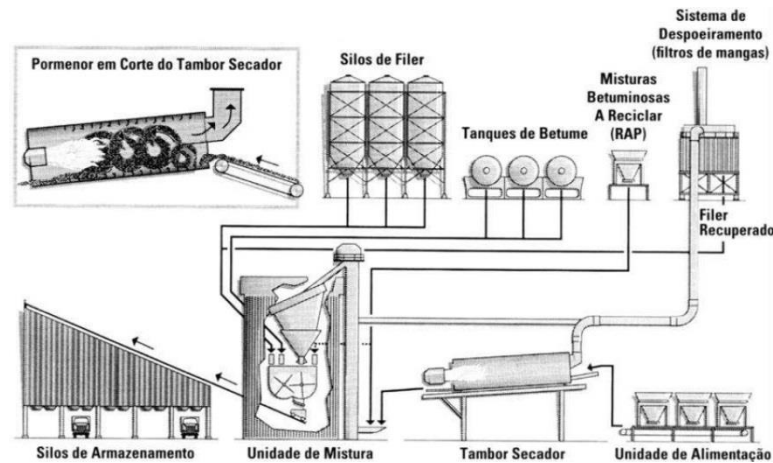


Fig.4.2 – Central Betuminosa Descontínua (Método com RAP a frio) [15]

Uma alternativa a esse processo seria complementar a central descontínua de fabrico, com a instalação de outro tambor secador destinado ao aquecimento, em separado, das misturas betuminosas fresadas [15], representado na Fig.4.3. O material a reciclar é pesado, aquecido e seco no segundo tambor, sendo depois transferido para o misturador através de um silo pré-doseador. Os agregados novos, a incorporar, são sobreaquecidos no primeiro tambor e transferidos para o misturador. Os gases quentes de combustão provenientes do tambor de reciclagem são dirigidos, quer diretamente para o tambor secador de materiais novos, como ar secundário, junto do queimador, quer para o sistema de despoeiramento [31]. Neste caso as percentagens de material a reciclar podem ir até 70% [15]. O limite percentual superior é determinado pelas exigências especificadas para a mistura betuminosa em relação às propriedades da mistura betuminosa antiga a reciclar [31].

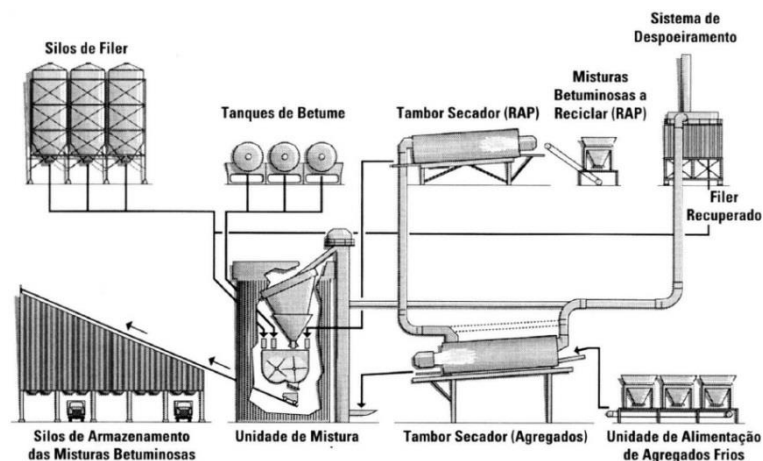


Fig.4.3 - Central Betuminosa Descontínua (Método com RAP a quente) [15]

4.2.2. RECICLAGEM A QUENTE *IN SITU*

Atualmente existem equipamentos especiais que permitem o aquecimento do pavimento existente, facilitando a sua desagregação e a mistura com um agente rejuvenescedor, geralmente uma emulsão betuminosa especificamente estudada para o tipo de mistura betuminosa a reciclar.

Este método é utilizado em estradas e autoestradas essencialmente para rejuvenescer a camada de desgaste do pavimento.

Existem dois tipos distintos de equipamentos, um com um sistema prévio de aquecimento do pavimento, e um outro que fresa a mistura betuminosa e a aquece num tambor secador misturador.

No primeiro sistema, o pavimento é aquecido através de um circuito de ar quente (até 600°C) o que, com ajuda de um sistema de infravermelhos que está sobreposto à camada a reciclar, permite que o pavimento atinja temperaturas de 150 a 160°C numa espessura até 6 cm. Seguidamente o pavimento quente é fresado, entrando posteriormente num misturador onde se junta um agente rejuvenescedor e possivelmente novos agregados. Seguidamente a mistura é colocada numa espalhadora de misturas betuminosas e compactada. O conjunto de equipamentos utilizado está esquematicamente representado na Fig.4.4 [32].

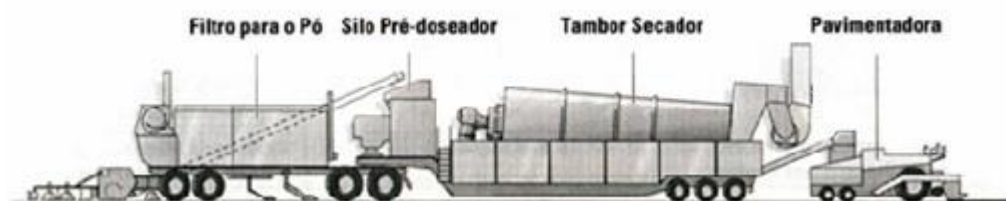


Fig.4.4 – Central móvel para reciclagem de misturas betuminosas [15]

No segundo sistema o material é fresado a frio e colocado num tambor secador misturador, onde se junta o agente rejuvenescedor. Posteriormente é colocado numa espalhadora e compactado [32].

No caso de se proceder à adição de matérias novos (betume, agregados, entre outros), o seu teor está limitado a 30% da massa do material a reciclar.

Centrais móveis, como as da Fig.4.4, são munidas de unidades de aquecimento dos diversos materiais. Devido, por um lado, à dimensão e complexidade dos equipamentos utilizados para a reciclagem a quente *in situ*, e por outro, ao facto de durante o fabrico da mistura serem emitidas substâncias para a atmosfera (resultante do aquecimento dos materiais), este tipo de solução pode conduzir a impactos sociais e ambientais consideráveis, para além de constituir um investimento financeiro importante [15].

4.2.3. RECICLAGEM A FRIO *IN SITU* COM EMULSÃO BETUMINOSA

Utiliza-se como ligante uma emulsão betuminosa. Este material é um sistema coloidal em que o betume se encontra disperso numa fase aquosa sob a forma de glóbulos discretos que se mantêm em suspensão devido a carga electrostática produzida por um emulsionante.

Para além de agregados e de emulsão betuminosa, em regra é ainda, utilizada água, visando facilitar o envolvimento dos agregados pela emulsão, bem como para efeitos de compactação da mistura. Tanto o fabrico da mistura assim como a sua compactação são realizadas à temperatura ambiente.

O processo de cura das misturas fabricadas com emulsão betuminosa está intimamente ligada com o seu processo de rotura. Esta dá-se com a eliminação da água presente na mistura que é expulsa no processo de compactação ou por evaporação. Este processo permite a mistura desenvolver as suas características mecânicas. O teor em água estabiliza em cerca de 1% ao fim de dois a quatro semanas após a aplicação. Após o teor de água estabilizar poder-se-á cobrir a camada, apesar da cura não estar ainda completa.

Uma vez que o fabrico e a aplicação deste tipo de misturas são realizados à temperatura ambiente, a sua utilização representa uma redução significativa dos gastos energéticos e da emissão de poluentes. O seu emprego numa redução de custos e de tempos de transporte e permite a utilização facilitada dos agregados locais. [15]

Este método é estudado com mais pormenor no capítulo seguinte pelo facto de ser nele que se insere o estudo laboratorial desenvolvido neste trabalho.

4.2.4. RECICLAGEM A FRIO *IN SITU* COM ESPUMA DE BETUME

4.2.4.1 Espuma de Betume e suas características

Este tipo de reciclagem caracteriza-se por utilizar a espuma de betume (foamed bitumen) como o ligante da mistura. A espuma, tal como a emulsão, é um sistema coloidal. No entanto a emulsão betuminosa é composta por dois líquidos imiscíveis, a água e o betume, que coabitam através de uma dispersão de pequenas gotículas de betume na água. Diferentemente, na espuma betume a fase dispersa é um gás, vapor de água num líquido, o betume.

Nesta técnica é necessário o aquecimento do betume e a produção de vapor de água. A sua produção, representada pela Fig.4.5, é conseguida quando uma pequena quantidade de água, geralmente na ordem de 2 a 3% [15], é adicionada a betume quente (usualmente acima de 170°C [33], preferencialmente até 180°C [12]). A esta temperatura a água passa ao estado de vapor. Após a obtenção da espuma pode-se considerar que o processo se desenvolve a frio [33]. O sistema obtido é altamente instável, o vapor provoca uma expansão do betume de aproximadamente 20 a 30 vezes o seu volume original [15], mas imediatamente este volume começa a diminuir, após poucos segundos (cerca de 25) o volume reduz para metade. A espuma de betume apresenta uma elevada superfície específica e muito baixa viscosidade. Em contacto com o agregado, reveste as partículas finas formando em mástique que une a mistura. O facto de a espuma ser instável obriga a que o envolvimento desta com o agregado seja quase imediato. A mistura obtida tem uma elevada estabilidade podendo ser trabalhada posteriormente, sem perda de resistência, desde que não haja alterações significativas da humidade após a compactação. Inclusivamente pode ser armazenada para posterior aplicação.

Para caracterizar a espuma de betume utilizam-se dois parâmetros i) a taxa de expansão final do betume após a dissipação, taxa de expansão média; ii) e a “meia-vida”. A taxa de expansão é a relação entre o volume máximo alcançado pela espuma e o volume final do betume após a dissipação da espuma. A meia-vida é o tempo em segundos, entre o instante que a espuma de betume alcança o volume máximo e o instante em que esse volume se reduz a metade.

Um aumento da temperatura do betume melhora geralmente as características da espuma de betume. Para temperaturas baixas do betume (120°C) não se produz espuma. Valores de taxa de expansão inferior a 4 e “meia-vida” inferior a 5 segundos tornam impraticável a execução da reciclagem. Um aumento da percentagem de água origina um aumento da taxa de expansão e um decréscimo da “meia-vida”. Apesar de não haver limites impostos para estas características, o ideal é que os seus valores sejam o maior possível, contudo a melhoria numa só é obtida pelo sacrifício da outra, é recomendável que a “meia-vida” seja superior a 12 segundos e a taxa de expansão superior a 10. Podem ser usados agentes espumantes para facilitar a obtenção dos valores desejados [33].

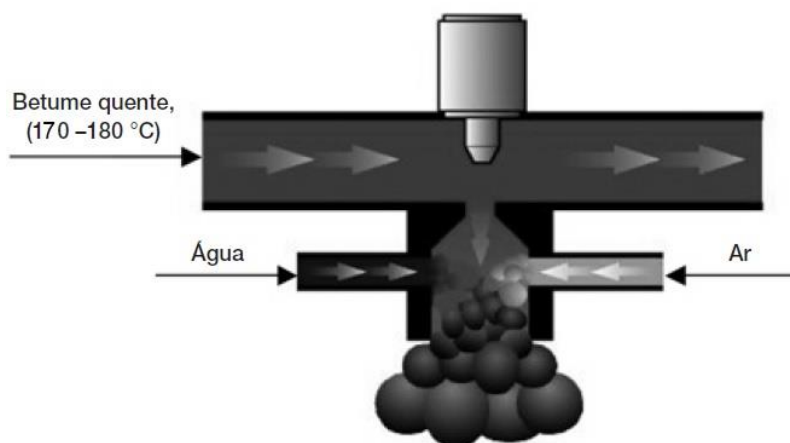


Fig.4.5 – Produção de betume espuma [12]

O envolvimento do agregado pelo betume nas misturas com espuma ao contrário das misturas com emulsão, é um processo físico tal como nas misturas a quente, logo é necessário baixar a viscosidade para valores compatíveis, valores de viscosidade dinâmica entre 0,2 a 0,5 Pa.s. A utilização da espuma para além de diminuir significativamente a viscosidade do betume aumenta também a superfície específica deste, permitindo a sua mistura com uma grande variedade de agregados frios e húmidos.

A mistura com o agregado necessita de menor quantidade de betume, do que as misturas a quente, pois quando a espuma entra em contacto com o agregado as bolhas de betume desfazem-se em milhões de minúsculas pintas que salpicam as partículas mais finas. As partículas mais grossas não são revestidas. Ao contrário das misturas betuminosas a quente, as misturas com espuma de betume não apresentam cor preta. Há só um escurecimento visível após a compactação.

A utilização de cal ou cimento ou outro fíler, além de melhorar a resistência retida após a exposição à água [12], ajuda o betume a dispersar, especialmente se o material a reciclar apresentar falta de finos. É necessário que o material a reciclar tenha no mínimo 5% de passados no peneiro 200 para possibilitar a execução da mistura com sucesso. A adição de cimento torna a mistura mais rígida e sem os inconvenientes da fissuração associados ao cimento pois a sua percentagem é baixa (inferior a 2%).

A reduzida percentagem de cimento, quer de betume conferem a estas misturas um bom comportamento à fadiga e deformação. Apresentam contudo pouca resistência à abrasão e desagregação superficial não podendo ser utilizadas como camada de desgaste [33].

Verifica-se uma redução de custos associados ao transporte, pois além de não ser necessário trazer agregados de fora, neste caso não se transporta água e betume, no caso das emulsões, mas apenas betume.

4.2.4.2 Execução

A temperatura ideal dos agregados durante a mistura com espuma é entre 13 a 23°C, dependendo do tipo de agregado utilizado. Para temperaturas inferiores a qualidade da mistura é fraca. O aquecimento dos agregados melhora a dispersão da espuma e facilita o revestimento das partículas maiores.

O equipamento a utilizar deverá ser composto no mínimo por uma recicladora para aplicação de espuma de betume; cisternas de betume com aquecimento; cisternas, mas agora para a água, para humidificar o material; uma cisterna de água para abastecer a recicladora; um cilindro vibrador; um

cilindro de pneus; e uma motoniveladora. Estes equipamentos, excetuando a recicladora, são comuns entre as empresas rodoviárias.

As perturbações com o trânsito são mínimas pois a rapidez de execução é elevada e ao contrário das soluções tradicionais não há remoção para fora do local da obra de materiais e colocação de material novo. Tal implica que durante a execução do trabalho há uma mobilização muito grande de veículos pesados. A reposição da circulação do trânsito é imediata podendo mesmo após a circulação proceder-se ao reperfilamento da rua sem qualquer inconveniente ou perda de resistência do material desde que se mantenha a percentagem de água utilizada na compactação [33].

4.2.5. RECICLAGEM A FRIO *IN SITU* COM CIMENTO

4.2.5.1 Cimento

A resistência à compressão e à tração obtida num material estabilizado com cimento é amplamente determinado pela quantidade de cimento que é adicionada, o tipo de material e a densidade do material compactado. A resistência geralmente aumenta linearmente com o teor de cimento, mas com taxas diferentes para os diferentes materiais e tipos de cimento. A densidade desempenha um papel importante na determinação da resistência, enquanto a temperatura ambiente afeta diretamente a taxa de ganho de resistência; quanto mais elevada a temperatura ambiente, mais rápida a taxa de ganho de resistência. Verifica-se o início da formação de ligações cristalinas entre as partículas assim que o cimento entra em contato com a água no processo de mistura. Algumas destas ligações são destruídas quando o material é perturbado (principalmente sob compactação), reduzindo assim a resistência que pode ser atingida. Além disso, tal ligação possui o efeito de reduzir a densidade máxima possível. Portanto, é importante apressar as operações de colocação e compactação após a reciclagem para obter a densidade máxima, assim como para obter as resistências previstas do material compactado.

As camadas recicladas com cimento apresentam, em relação à reciclagem com emulsão betuminosa maiores resistências à compressão e maiores módulos de deformabilidade. No entanto, camadas estabilizadas com cimento estão mais propensas à fissuração. Durante a execução da camada é necessário proceder-se ao controlo do fendilhamento por retração, provocado pela libertação do calor de hidratação que ocorre durante a cura. Para controlar este fenómeno, é frequente recorrer-se a técnicas que consistem na criação artificial de “fendas” com espaçamento pré-definido, Como por exemplo, “pré-fissuração” [12].

4.2.5.2 Aplicação do cimento

O processo construtivo correspondente à reciclagem a frio *in situ* com cimento é bastante semelhante ao utilizado na reciclagem com emulsão betuminosa, discutida com detalhe no capítulo seguinte, com exceção à forma de adição do ligante empregue, o cimento. Podem-se distinguir cinco procedimentos de adição do cimento.

1. Adiciona-se ao material fresado, o cimento e a água em separado
2. Junta-se previamente o cimento e a água, injetando-se de seguida, a calda assim formada, ao material fresado
3. Adição de cimento previamente à passagem da recicladora.

Neste caso, a adição pode ser feita manualmente ou mecanicamente. A primeira faz-se com a colocação de sacos sobre o pavimento, em quadrículas pré-definidas, verificando-se uma certa

dificuldade em garantir uma distribuição homogênea de cimento, e por isso é geralmente aplicada a obras de pequena dimensão e para tráfego reduzido. O segundo faz-se com recurso a pulverizadores mecânicos. Neste caso o cimento deve ser espalhado o mais uniformemente possível, tendo em conta a dosagem estabelecida. O tempo que decorre entre o espalhamento do ligante e a passagem da máquina recicladora deve ser o menor possível [33].

Qualquer forma de distribuição do cimento seco, é afetado pelo clima, especialmente pelo vento e pela chuva. Por ser um pó fino, o cimento é suscetível à erosão do vento e torna-se imediatamente aerotransportável, incluindo o efeito oscilatório resultante da passagem dos camiões. Tais perdas reduzem, de maneira não uniforme, a taxa de aplicação. A chuva que cai sobre o cimento espalhado também ativa o processo de hidratação devendo ser imediatamente misturado ou eliminado [12].

4. Adição de cimento através de dispositivos que se instalam à frente da máquina recicladora.

Estes dispositivos garantem a adição da dosagem de cimento estabelecido. O cimento é retirado do distribuidor através de uma comporta rotativa e espalhado uniformemente na superfície da via imediatamente à frente da câmara de fresagem e de mistura recicladora. Este sistema “sem poeira” minimiza o levantamento do pó para fora da zona alvo. Possibilitam também a realização dos trabalhos em condições atmosféricas mais desfavoráveis.

5. Adição de calda de cimento e água através de misturadoras móveis que circulam acopladas à máquina recicladora.

A utilização destes misturadores permite a mistura do cimento e da água nas dosagens exatas e, tal como no caso anterior, não levanta qualquer nuvem de cimento [33].

5

RECICLAGEM DE PAVIMENTOS BETUMINOSOS A FRIO *IN SITU* COM EMULSÃO BETUMINOSA

5.1. INTRODUÇÃO

A reciclagem a frio não é um método recente de reabilitação de pavimentos envelhecidos. Há mais de 50 anos que esta técnica tem sido aplicada utilizando variados procedimentos. Emulsões betuminosas, betumes fluidificados e outros aditivos de reciclagem têm sido empregues na reabilitação de pavimentos envelhecidos [22].

A reciclagem *in situ* a frio consiste essencialmente em fresar o pavimento existente numa espessura pré-determinada, com o objetivo, de no mesmo sitio, misturar o material resultante com um ou vários ligantes, sem aquecimento, coloca-lo e compacta-lo, assegurando a espessura desejada para a camada. O material da construção inicial, degradado, é então reciclado e processado formando uma nova camada do pavimento de resistência mecânica melhorada [31].

A reciclagem *in situ* a frio é a mais rápida, mais económica, menos destrutiva e de preferência ambiental devido à redução de transporte de materiais. Normalmente não é necessário o transporte de materiais, com exceção dos aditivos de reciclagem que poderão ser utilizados.

A mistura final é geralmente utilizada como camada de base, sendo posteriormente revestida com uma ou mais camadas de uma mistura betuminosa nova.

A profundidade do tratamento é geralmente de 75 mm a 100 mm, quando só são processadas as camadas betuminosas, podendo atingir maiores profundidades quando a reciclagem do pavimento envolve também as camadas granulares.

5.2. PROCESSO DE RECICLAGEM

O desenvolvimento no fabrico de equipamentos permitiu os avanços notáveis no processo de reciclagem *in situ* a frio, nomeadamente no aumento da eficácia e sofisticação das máquinas recicladoras [22].

Como estas são projetadas especificamente para reciclar camadas espessas de pavimentos numa única passagem, as recicladoras mais modernas tendem a ser máquinas de grande porte, mais complexas e potentes, as quais podem ser de pneus ou estar montadas sobre lagartas [12]. Conseguem assim processar mais de 3,2 Km de estrada por dia. O resultado são estradas estáveis e reabilitadas gastando menos de 40 a 50% do orçamentado que os métodos convencionais [22].

Anteriormente à reciclagem deve-se identificar possíveis áreas de espessuras não uniformes. Deve-se também identificar áreas cujos pavimentos não apresentem espessura suficiente ou subleitos de resistência inferior à necessária para suportar o peso da série de equipamentos de reciclagem. Se estas situações não forem corrigidas, corre-se o risco dos equipamentos romperem o pavimento, causando atrasos na construção, aumentando assim o seu orçamento inicial. Material mais fraco deve ser substituído por material de resistência adequada. Áreas de projeto que exibam geada devem ser também identificadas e os materiais suscetíveis a este fenómeno devem ser removidos e substituídos também por material adequado [22].

O coração de uma máquina de reciclagem é o tambor fresador/misturador, equipado com uma variedade de ferramentas especiais de corte [12], conforme é ilustrado na Fig. 5.1.

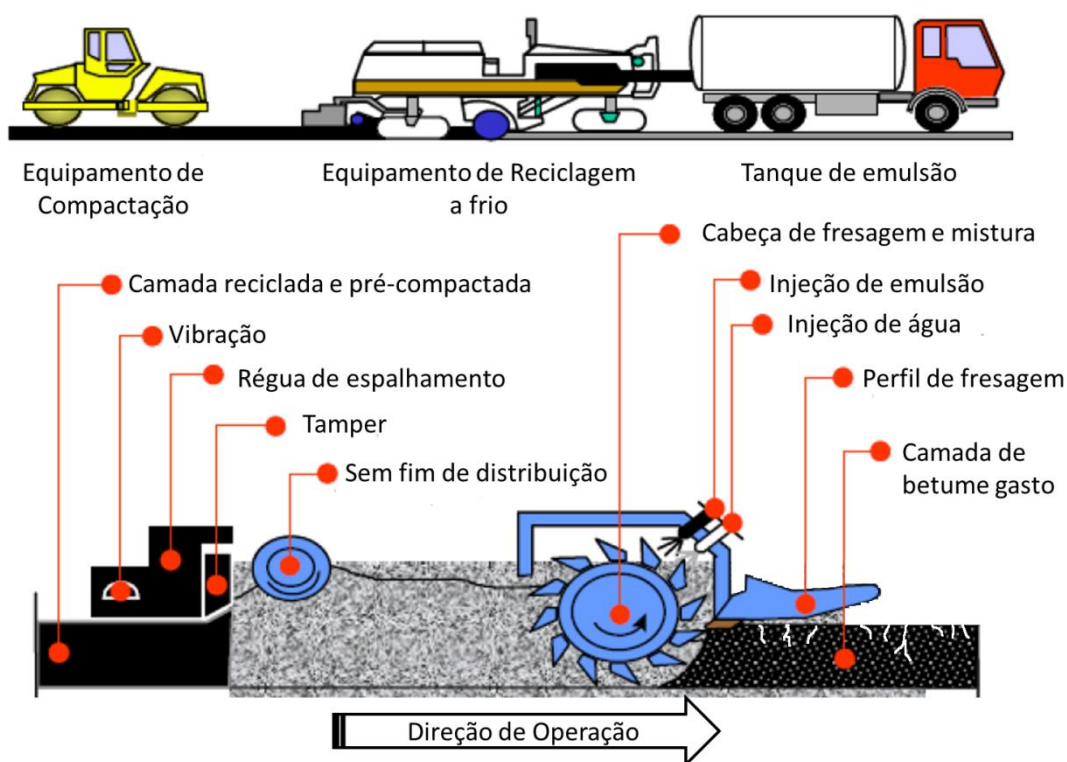


Fig. 5.1 - Esquema das operações de reciclagem do pavimento

Conforme a máquina se movimentar para frente o tambor gira para cima, fresando o pavimento existente, pulverizando o material.

Os principais passos da técnica de reciclagem *in situ* com emulsão betuminosa são:

1. Espalhamento, antes da passagem da máquina recicladora, de eventuais materiais corretivos estabelecidos na fórmula de trabalho, com o apoio de equipamento próprio para esse efeito;
2. Passagem do comboio formado pela recicladora e pelas cisternas de emulsão e água, onde se inicia o processo de fresagem até à profundidade especificada, adição do ligante betuminoso e da água nas percentagens da fórmula de trabalho e mistura de todos os materiais;
3. Espalhamento e nivelamento da mistura reciclada;
4. Compactação da nova camada.

A recicladora executa em simultâneo as funções de desagregação do pavimento e mistura da emulsão e água através de injetores diretamente ligados às cisternas de alimentação. A potência e velocidade da máquina afetam a granulometria da mistura, pelo que a escolha do equipamento assume um papel importante nas obras a realizar.

A Fig. 5.2 representa a secção de um pavimento antes e depois da intervenção de reabilitação com recurso à técnica de reciclagem.

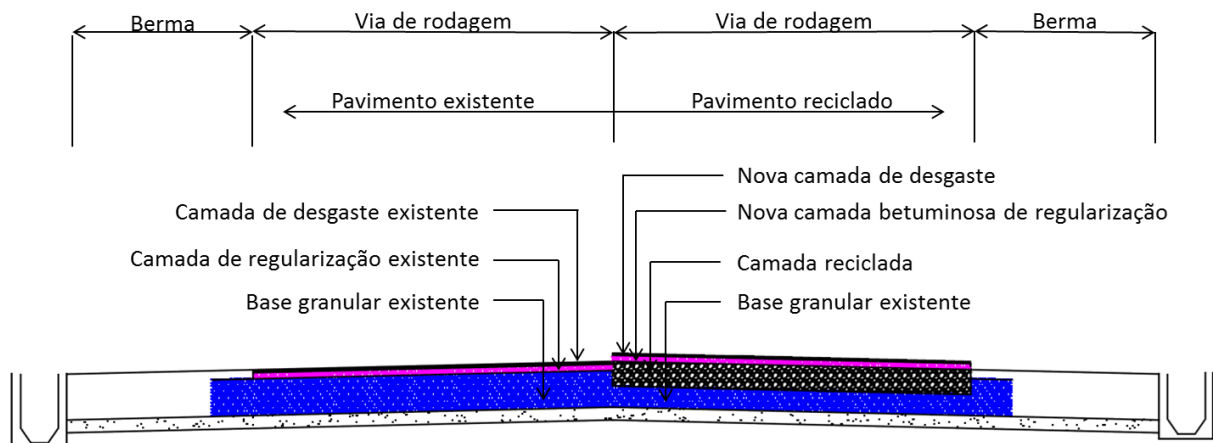


Fig. 5.2 - Secção de um pavimento antes e após a reciclagem

A sucessão de equipamentos de reciclagem pode ser configurada de forma diferente, dependendo da aplicação da reciclagem e do tipo de agente estabilizador que é utilizado. Em cada caso a máquina de reciclagem age como uma locomotiva e, ou empurra ou puxa o equipamento que está acoplado a ela por meio de braços de empurrar ou barras de tração. A Fig. 5.1 exemplifica também o chamado “comboio” de reciclagem com a recicladora e as cisternas de emulsão e água.

O material que sai da recicladora recebe uma compactação inicial de um rolo vibrador pesado para atingir uma densidade uniforme em todo o material reciclado. Este material é então perfilado com uma motoniveladora, antes de ser finalmente compactado utilizando rolos vibratórios e pneumáticos.

5.3. AGENTES

É necessária uma seleção ponderada do tipo e do teor do agente, ou aditivo de reciclagem, a adicionar à mistura para uma correta execução da reciclagem a frio. Os agentes mais comuns que usualmente se acrescentam nas misturas de reciclagem a frio são emulsões betuminosas e agentes emulsionantes, uma vez que estes agentes são líquidos a temperaturas ambientes e conseguem rapidamente dispersar-se na mistura. Tem-se vindo a utilizar versões modificadas de emulsões betuminosas e de agentes emulsionantes visando melhorar a resistência inicial, resistência à deformação permanente e à fissuração por retração térmica [22].

O comportamento de materiais estabilizados com betume é semelhante ao apresentado por materiais granulares soltos, mas com uma significativa melhoria na força de coesão e na redução da sensibilidade à humidade [34].

Podem-se ainda incorporar outros modificadores, como cimento Portland ou cal hidratada para melhorar as propriedades da mistura de reciclagem. O cimento Portland ou a cal têm vindo a ser usados juntamente com a emulsão betuminosa para melhorar a cura precoce e a resistência a teores elevados de humidade [22].

5.4. EMULSÃO BETUMINOSA

5.4.1. INTRODUÇÃO

Historicamente pode-se dizer que a patente de invenção nº202021, registrada pelo químico inglês Hugh Alan Machay em 9 de Maio de 1922, marcou o ponto de partida para uma nova geração de ligantes betuminosos que revolucionaram os revestimentos betuminosos rodoviários. Em 1951 a Esso, na França, deu um passo importante na utilização desse produto, quando colocou à disposição do mercado as emulsões catiónicas [35].

No processo de fabrico de misturas betuminosas, para que o betume consiga recobrir convenientemente os agregados, é necessário que esse apresente uma viscosidade ótima. Tradicionalmente, para se conseguir essa viscosidade eleva-se a temperatura do ligante pelo processo dito a quente [10].

A produção das misturas betuminosas a quente requer o aquecimento dos agregados e do betume em centrais com aquecedores de óleo térmico, o que acarreta maiores custos operacionais e energéticos [35].

Em contrapartida, os betumes de destilação direta podem ser trabalhados de forma a possibilitar um processo de adsorção, do ligante ao agregado, a frio, uma vez que se prescinde do respetivo aquecimento.

Dois processos muito próximos que visam propiciar diversas técnicas ditas “a frio” são a fluidificação, que consiste em dissolver o betume em compostos derivados da destilação fracionada do petróleo bruto, designados geralmente por “cut-back”, sendo utilizados como solventes os produtos emergentes da destilação fracionada entre os níveis de 160°C e de 230°C, e a fluxação que consiste em dissolver o betume em compostos derivados da destilação fracionada do alcatrão hulha [38] (ou carvão betuminoso, um tipo de carvão mineral que contém betume [39]), entre os níveis de 170°C e 350°C, salientando que não subsistem os problemas ligados ao carácter cancerígeno dos vapores libertados quando do recurso ao alcatrão em trabalhos rodoviários (devido ao não aquecimento do material), hoje interdito [38].

A produção de betuminoso a partir de asfaltos diluídos de petróleo tem origem numa matéria-prima de custo social e financeiro exigente, pois o solvente emana para atmosfera, gerando problemas de segurança, de meio ambiente e de saúde pública.

Outro processo que possibilita a adsorção a frio, encontrada ainda no início do século passado, mas que somente a partir da década de 1950 passou a fazer parte do dia dos técnicos [35], é o uso das emulsões betuminosas (utilizando betume, fluidificado em diversos graus ou até fluxado) [38].

As emulsões betuminosas foram originalmente desenvolvidas para superar as dificuldades de se trabalhar com betume quente. O incentivo para a redução do consumo de energia na crise desenvolvida de combustível de 1970 impulsionou a utilização de emulsões para a estabilização de agregados minerais, incluindo a mistura com material húmido à temperatura ambiente [12].

A *Asphalt Emulsion Manufacturers Association* (AEMA) define emulsão betuminosa como: “Combinação de três componentes básicos: betume, água e emulsionante. Na emulsificação, esses componentes são introduzidos num mecanismo conhecido como moinho coloidal, que cisalha o betume em pequenos glóbulos. O emulsionante, que é um agente tensoativo, mantém os glóbulos em suspensão estável além de conferir estabilidade à rotura. O resultado é um produto líquido de coloração castanha, com consistência variando entre água e um creme, usado em processos a frio de construção e manutenção das estradas” [35].

A água e o betume não se misturam, exceto sobre condições cuidadosamente controladas, usando equipamentos altamente especializados e aditivos químicos.

O objetivo é produzir uma dispersão de betume na água, suficientemente estável durante a bombagem, para o armazenamento e aplicação. Além disso, a emulsão deve romper-se rapidamente após o contato com agregado. Após a cura, o betume residual retém toda a aderência, durabilidade e resistência à água [40].

As emulsões fazem parte do conjunto de sistemas dispersos que mais têm sido exploradas no campo industrial, ao lado das suspensões [38].

Uma emulsão betuminosa, utilizada para fins rodoviários, é uma dispersão de betume em água, constituindo um ligante que beneficia das propriedades coesivas e adesivas do betume perante os agregados. A sua baixa viscosidade e a sua trabalhabilidade à temperatura ambiente fazem com que ela seja escolhida como um ligante nos trabalhos rodoviários de conservação.

Na emulsão mantida em repouso, as partículas tendem a dirigir-se para baixo ou para a superfície. Inicia-se a sedimentação, respetivamente. Este fenómeno é provocado pela diferença de densidade existente entre as duas fases. Quando a emulsão é abandonada num recipiente, ao fim de um período mais ou menos longo (a partir de um dia até vários meses) as suas duas fases têm tendência de se separar progressivamente pelos fenómenos descritos anteriormente, conforme a densidade do betume [41].

5.4.2. CONSTITUINTES

5.4.2.1. Betume

O betume é o ingrediente básico da emulsão betuminosa cujo teor pode variar entre 30% a 70%, mas percentagens de betume superiores a 60% não são recomendados para a reciclagem pois a emulsão torna-se viscosa, e assim mais difícil de bombear e cobrir o agregado [12].

As suas qualidades físicas e químicas tornam-no um material de elevada importância. Ele possui um grande poder aglomerante pois adere à maioria dos materiais usuais: pedra, betão, madeira, metal e vidro. É um excelente isolante térmico, dielétrico e acústico. Leve, dúctil e flexível, do ponto de vista mecânico, ele comporta-se como um material plástico ou elástico, de acordo com as condições de serviço a que está submetido. Insolúvel em água, pode-se obter soluções em numerosos solventes orgânicos [41].

O betume é um coloide composto por várias frações, em que as principais são compostas por asfaltenos e maltenos (óleos saturados, aromáticos e resinas). A composição coloidal do betume depende da natureza química e das percentagens dessas frações e da relação entre elas. Os asfaltenos são a fase dispersa do betume e os maltenos são a respetiva fase contínua. Os asfaltenos são responsáveis pela dureza [40], pela cor castanha ou preta do betume, sólida à temperatura ambiente [35], e os maltenos proporcionam as propriedades adesivas e de ductilidade do betume. Os maltenos

que estão presentes têm uma influência sobre a viscosidade do betume. A complexidade da interação das diferentes frações torna quase impossível de prever com precisão o comportamento do betume a ser emulsionado [40].

5.4.2.2. Água de dispersão

O segundo maior ingrediente da emulsão é a água, logo a sua contribuição para o produto final desejado é muito importante. A água molha; consegue-se aderir a outras substâncias; e modera reações químicas [40]. Por outro lado, a água pode conter minerais ou outras substâncias que afetam a produção de emulsões estáveis. Por essa razão a água utilizada no fabrico da emulsão é escolhida de modo a conter o mínimo de impurezas orgânicas e minerais [41].

5.4.2.3. Emulsionantes

A obtenção de uma dispersão estável de betume em água necessita, entre outros, do emprego de uma substância que tenha afinidade ao mesmo tempo com o betume e com a água de dispersão. Esta substância é chamada de emulsionante.

É um composto de tipo polar-apelar, cadeia hidrocarbonada apolar "versus" cabeça polar ionizável, com ação tensoactiva, que se introduz no sistema como "energia química", complementar da "energia mecânica" de dispersão, com vista a que esta tenha um grau de estabilidade aceitável.

Dizer que o emulsionante é uma substância tensoativa significa que este diminui a energia ou a tensão superficial e aumenta a área interfacial entre as fases (betume e água), aproximadamente 500m^2 por litro [35].

As propriedades de uma emulsão asfáltica dependem muito do emulsionante utilizado. É o emulsionante que determina se a emulsão betuminosa é aniónica, catiónica ou não-iónica [40]. As gotículas de betume ficam separadas devido a um campo de forças formado pelas cargas electrostáticas produzidas pelo emulsionante. A estabilidade da emulsão depende deste campo de forças.

O emulsionante pode ser introduzido no betume, na água de dispersão (caso mais frequente) ou ao mesmo tempo na água e no betume. Durante o fabrico da emulsão, a parte do emulsionante fixa-se por adsorção na interface água/betume e faz o papel de filme protetor em torno de cada partícula de betume disperso [41].

5.4.3. TIPOS

As emulsões betuminosas podem ser caracterizadas segundo diferentes parâmetros de classificação.

Fora de parte tipos de emulsão sem grande interesse atual em aplicações rodoviárias (múltiplas, inversas, não-iónicas), as emulsões de betume subdividem-se em dois grandes grupos: as "aniónicas" e as "catiónicas". Trata-se, em ambos os casos, de emulsões em que a fase contínua é basicamente, a água (emulsão direta – dispersão óleo em água) [38].

As classificações "aniónica" e "catiónica" referem-se às cargas elétricas que cercam as partículas do betume, conferidas pelos emulsionantes utilizados. Se o emulsionante é do tipo catiónico, as gotículas ficam carregadas positivamente – emulsões catiónica – enquanto com um emulsionante aniónico a carga será negativa - emulsão aniónica, como esquematizado na Fig. 5.3.

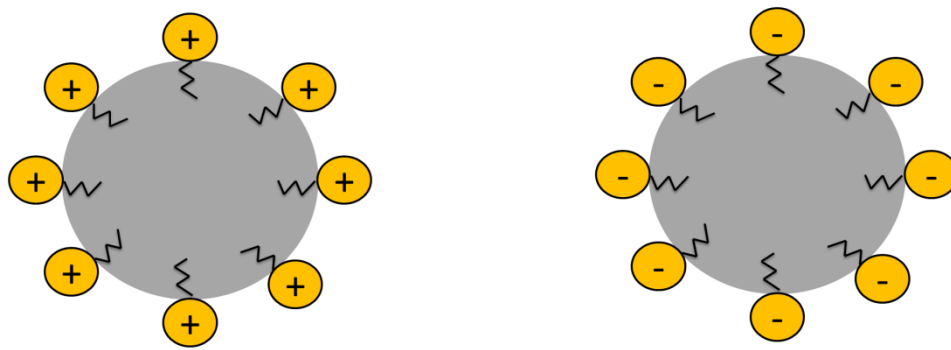


Fig. 5.3 - Exemplos de emulsão betuminosa catiônica (esquerda) e emulsão betuminosa aniônica (direita)

Nas emulsões catiônicas, as partículas dispersas possuem carga elétrica adsorvida positiva, rodeada por uma "camada de íons" com carga elétrica negativa, mais dispersa, apresentando afinidade para superfícies carregadas negativamente (os glóbulos dispersos deslocam-se para o cátodo, durante o fenómeno da electroferese¹). Nas emulsões aniônicas, como o seu próprio nome indica, as partículas dispersas possuem carga elétrica adsorvida negativa, rodeada por uma "camada de íons" com carga elétrica positiva, mais dispersa, apresentando afinidade para superfícies carregadas positivamente os glóbulos dispersos deslocam-se para o ânodo, durante o fenómeno da electroferese).

A separação entre as fases de água e betume é conhecida como rotura da emulsão. O tempo necessário para que ocorra essa separação confere às emulsões características intrínsecas à aplicação em campo, servindo, também como base para a sua classificação quanto á velocidade de rotura.

Conforme o tipo e proporção do emulsionante utilizado, as características do ligante de base (mormente a viscosidade, que pode variar muito entre a situação de betume "puro" ou fortemente fluidificado), a concentração volumétrica da fase interna e vários outros fatores, pode-se ainda dividir estas emulsões, em função das correspondentes velocidades de rotura, em emulsões de rotura rápida, de rotura média ou de rotura lenta [38]. As emulsões de rotura lenta têm pouca ou nenhuma habilidade de se misturarem com os agregados; as de rotura média tendem a misturar-se com o agregado grosso mas não com o fino; e as de rotura rápida é o indicado para se misturar com agregado fino [40].

5.4.4. EMULSÕES BETUMINOSAS MODIFICADAS COM POLÍMEROS

Os polímeros melhoram a coesão do betume aos agregados e por isso são usualmente utilizados na modificação de betumes emulsionados com vista à obtenção de resultados mais duráveis.

A técnica mais comum de fabrico das emulsões betuminosas modificadas com polímero é a preparação prévia da emulsão do látex (tipo SBR) com agentes emulsionantes, para posterior fabrico da emulsão com a fase aquosa resultante do processo anterior. Outra possibilidade é o fabrico prévio do betume modificado com SBS (elastômero termoplástico²), para posterior emulsificação. A percentagem de polímero sobre o ligante varia em torno de 1% a 4% em geral.

¹ A electroferese consiste na deslocação das partículas coloidais num campo eletromagnético [51]

² "Um elastômero termoplástico é uma mistura de polímeros (blend) ou composto que, acima da sua temperatura de fusão, exibe um carácter termoplástico, o que lhe permite ser moldado e transformado em produtos finais os quais, dentro de uma definida gama de temperaturas e, sem que tenha ocorrido qualquer processo de reticulação durante a fabricação, possuem um comportamento elastomérico. Este processo é reversível e os produtos podem ser reprocessados e de novo moldados" [44].

Em relação às emulsões betuminosas convencionais, as emulsões modificadas por polímeros SBS e SBR apresentam, entre outras propriedades, melhor adesão e coesão aos agregados, menor suscetibilidade térmica, maior ponto de amolecimento e resistência ao envelhecimento. Também aumentam a recuperação elástica do ligante betuminoso residual e consequentemente, a flexibilidade e a durabilidade dos revestimentos betuminosos delgados [35].

Uma emulsão com polímero é aplicada em média a 70°C, sendo essencial a viscosidade desse material, pois o escorrimento da emulsão deve ser evitado durante a aplicação [5].

5.4.6. PRODUÇÃO DE EMULSÕES

No processo de emulsão, é necessário que se promova a quebra do betume em partículas micrométricas e que o mesmo fique disperso no meio aquoso.

No processo convencional o betume é aquecido a uma temperatura entre 140 a 145°C e a fase aquosa entre 50 a 60°C, no qual já se encontram previamente dissolvidos os agentes emulsionantes. A principal finalidade dos emulsionantes é evitar que as partículas de betume se aglomerem, de forma a manter as duas fases em equilíbrio durante um período que pode variar de algumas semanas a alguns meses [35].

O fabrico de emulsões em central resulta da junção de uma dose de ligante, emulsionantes e água, num moinho coloidal. O betume é submetido a intensas forças de corte, sendo depois bombeada para tanques de armazenamento. Estes tanques são por vezes equipados com algum tipo de dispositivo de agitação para manter o produto uniformemente misturado.

O betume aquecido, a base da emulsão betuminosa, é direcionado para dentro de um moinho coloidal onde é dividido em pequenas partículas. Ao mesmo tempo, a água que contém o agente emulsionante é também lançado para o moinho coloidal. À medida que o betume entra no moinho, esse é aquecido de maneira a assegurar a sua viscosidade, e a temperatura da água é ajustada de acordo [40]. A Fig. 5.4 ilustra melhor o processo de fabrico.

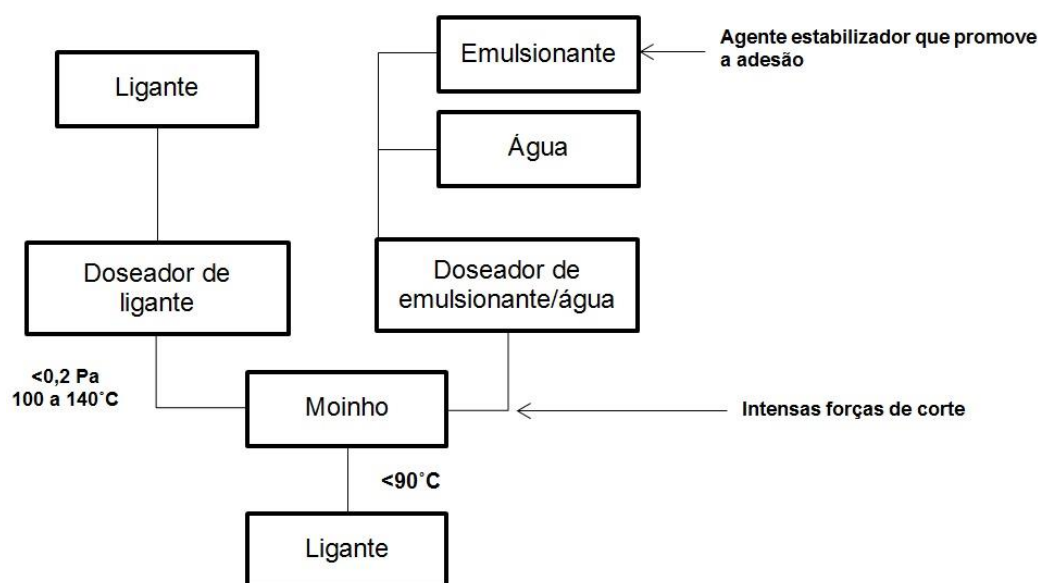


Fig. 5.4 - Fabrico de emulsões

5.4.7. VISCOSIDADE

A viscosidade é um parâmetro importante da emulsão. A sua determinação é delicada, pois o produto é uma dispersão heterogênea. Desta maneira, não se pode realmente falar de viscosidade no sentido preciso do termo mas antes de pseudo-viscosidade [41].

A viscosidade da emulsão depende de numerosos parâmetros:

a) Concentração de betume

A viscosidade das emulsões aumenta muito rapidamente com a concentração da emulsão mas deve-se notar que este aumento não é diretamente proporcional ao teor de betume. Abaixo de um valor fixo em 60 % para as emulsões aniônicas e 65% para as catiônicas, a viscosidade varia relativamente pouco com a percentagem de betume. Pelo contrário, acima destes valores, uma pequena mudança de concentração, de natureza do betume, ou da qualidade dos emulsionantes pode provocar variações importantes na viscosidade [41].

b) Viscosidade da fase dispersante

A viscosidade da fase dispersante não é, como se poderia crer igual à da água, mas diretamente dependente da natureza e da percentagem do agente emulsionante introduzido na fase dispersante.

É assim que os agentes podem dar lugar à formação de “géis”, que aumentando a viscosidade da fase dispersante, podem fazer, por vezes, que a viscosidade própria das emulsões seja aumentada em proporções consideráveis [41].

c) Sal do betume

A influência do sal solúvel contido no betume aumenta a viscosidade das emulsões ficou muito tempo ignorada. Sabe-se agora que um excesso de sal age sobre a viscosidade das emulsões fabricadas, no sentido de aumentá-la [41].

d) Suscetibilidade à temperatura

A viscosidade da emulsão varia com a temperatura. A suscetibilidade à temperatura está ligada à rapidez da variação desta viscosidade.

Verifica-se que a emulsão é, entre todos os ligantes, aquele que é menos suscetível. É um trunfo precioso dentro da flexibilidade da utilização da emulsão.

Numerosos fatores podem influenciar a suscetibilidade e entre eles estão a natureza e a concentração do ligante, a fase aquosa, a sua concentração de agente e a natureza dos emulsionantes.

Esta particularidade é utilizada para a aplicação das emulsões aquosas muito concentradas, onde a elevação da temperatura permite atingir uma viscosidade suficientemente baixa compatível com os meios de espalhamento que se dispõe [41].

5.4.8. ROTURA

O fenómeno da rotura das emulsões betuminosas deve ocorrer em presença dos agregados, “instabilização” que deverá ser condicionada às técnicas de aplicação em obra e, portanto, aos fins em

vista; em particular os aspetos ligados à velocidade de rotura deverão ser criteriosamente regulados de acordo com a utilização prevista (misturas betuminosas, impregnações, revestimentos superficiais, regas de colagem, etc.). Como é evidente, emulsões absolutamente estáveis frente aos agregados não teriam qualquer interesse do ponto de vista rodoviário.

A floculação e a coalescência constituem duas etapas do processo de coagulação ou separação das duas fases, sendo a primeira um fenómeno reversível e a segunda irreversível. A coalescência de glóbulos dispersos pressupõe que estes já se encontrem floculados e, a verificar-se de um modo generalizado, conduz inevitavelmente à desemulsificação total (rotura). Mas o mecanismo de rotura que mais interessa, no contexto deste trabalho, não é o ligado àqueles fenómenos, intrínseca da própria emulsão, mas o que ocorre na presença dos agregados de natureza e características variadas para as emulsões aniónicas e para as catiónicas [38].

Para que a emulsão execute a sua função última de cimentação e de impermeabilização, o betume tem de se separar da fase aquosa. As partículas de betume coalescem e produzem um filme contínuo de betume nos agregados ou no pavimento. Uma emulsão de rotura rápida irá romper dentro de 1 a 5 minutos, dependendo das condições climáticas, vento e humidade, depois de ser aplicada, enquanto uma emulsão de rotura média ou lenta pode demorar consideravelmente mais tempo.

A taxa de rotura é controlada em primeiro lugar pelo tipo e concentração do agente emulsionante utilizado, assim como as condições atmosféricas e do tipo de agregado.

O facto dos diferentes tipos de agregados terem diferentes taxas de adsorção significa que a rotura também está relacionada com a capacidade de adsorção do agregado utilizado, nomeadamente da sua natureza química [41] essencialmente da percentagem de sílica [38]. Aqueles que apresentarem altas taxas de adsorção tendem a acelerar a rotura da emulsão devido à aceleração da remoção da água emulsificada.

Nas misturas de agregado/emulsão betuminosa, a granulometria e a área de superfície do agregado também são fatores que influenciam a taxa de rotura. Como as áreas de superfície variam, as características de rotura da emulsão também variam devido às diferentes capacidades de adsorção do agente emulsionante pelo agregado [40].

No caso das emulsões aniónicas, é necessário o desaparecimento de parte da água, por evaporação e absorvida pelos agregados, para que a rotura se concretize. À medida que a água vai desaparecendo o PH aumenta (sobe a concentração em iões OH^-) até que a força iónica se torna excessiva e a emulsão se desestabiliza: face a um grande aumento da $[\text{OH}^-]$, a parte polar dos aniões tensoativos estabilizantes perdem a sua afinidade para com a fase aquosa, o que facilita enormemente a coalescência, uma vez que aqueles aniões podem até ser totalmente englobados pelos glóbulos de betume dispersos, perdendo assim quase por completo a sua eficácia protetora.

É de salientar que, enquanto se desenvolve o mecanismo exposto, o betume permanece “isolado” do agregado por uma película de água, e só com o desaparecimento completo desta se verifica, de facto, a aderência entre ambos. Não é por acaso que tal sucede, já que a película de água entre os glóbulos coalescidos e o agregado possui forte concentração em iões OH^- (tanto maior quanto mais próximo do seu final estiver o processo “evaporação/absorção/difusão” da água), circunstância que gera certa oposição à aproximação mútua final, mediante preponderância da repulsão eletrostática “glóbulos-agregados”. Quando totalmente desaparecida a água, a aderência “betume-agregado” fica garantida pelas cargas elétricas superficiais.

O mecanismo de rotura das emulsões catiónicas, face aos agregados, é substancialmente diferente do que foi exposto para as aniónicas. Embora a evaporação da água conduzisse, inevitavelmente, à rotura

por um mecanismo similar, chegando-se à instabilidade pela diminuição excessiva do PH (aumento da concentração de iões H_3O^+ - Hidrônio), sucede que o processo básico de rotura destas emulsões é bastante mais rápido do que aquele, o qual nem chega a ter qualquer relevância. A absorção de água pelos agregados ainda poderá ter significado, quando aqueles se apresentam bastante secos.

A rotura das emulsões catiónicas (Fig. 5.5) é preponderantemente condicionada por fenómenos de carga elétrica, sendo a parte polar do catião tensoativo emulsionante adsorvida pelos agregados, dependendo do carácter ácido ou básico destes e da quantidade de água presente (salvaguardando a manutenção do PH dentro da “banda de adesividade”). Resulta daqui que o processo de rotura se desencadeia a partir do contacto “emulsão-agregado”, verificando-se adesão imediata do betume, mesmo aos agregados húmidos.

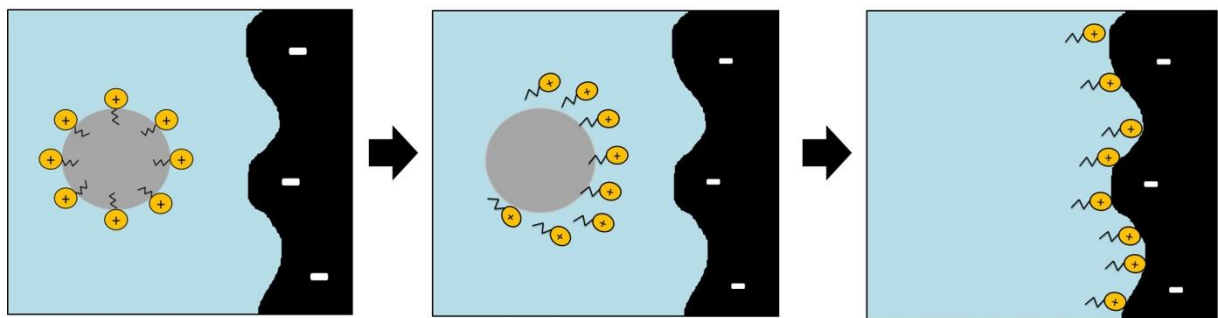


Fig. 5.5 - Rotura de uma emulsão catiónica

A diferença entre os mecanismos de rotura preponderantes em cada um dos tipos de emulsão considerados é responsável pela preferência que crescentemente tem sido dada às catiónicas em detrimento das aniónicas, que se veem reservadas para aplicações muito específicas. Na verdade, um comportamento aceitável frente a qualquer tipo de agregado, em especial ácidos (rochas ricas em sílica), e uma maior suscetibilidade às condições meteorológicas e ao tráfego, são razões que bastam para que tal preferência se tenha generalizado.

Apenas em modo de esclarecimento é importante distinguir adsorção de absorção. Enquanto neste último as moléculas do absorvido penetram para além da superfície do adsorvente, a adsorção consiste na formação de uma película de uma substância (adsorvida) sobre a superfície de outra (adsorvente) [38].

Com o processo de rotura concluído segue-se o processo de cura com o aumento da dureza e resistência à tração da camada estabilizada com emulsão betuminosa. Este aumento é necessário pois a mistura precisa de adquirir dureza e aderência entre partículas, antes de se permitir a passagem do tráfego sobre a nova camada [12].

5.5. LIGANTES HIDRÁULICOS

Certos materiais tratados com agentes estabilizadores betuminosos apresentam uma fraca capacidade de retenção da tensão (isto é, eles perdem força quando submersos em água). Isto pode ser ultrapassado recorrendo à adição de um “fíler ativo” como cal hidratada ou cimento. Pequenas quantidades de fíler ativo (0,5 a 1,5 % por massa) podem aumentar significativamente a resistência

retida sem afetar as propriedades de fadiga da camada. O fíler ativo promove a rotura quando utilizado com emulsão betuminosa [12].

O uso de cal (seja sob a forma de cal hidratada em pó ou em forma de lama) ou de cimento Portland resulta numa melhoria significativa de valores de módulo de resiliência de misturas utilizadas em processos de reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa. As misturas que utilizam cal hidratada em pó apresentam um pior comportamento, enquanto a utilização de cimento leva a valores mais elevados e por conseguinte a camadas mais resistentes [42]. Em determinados ensaios, diferentes do referido, verificou-se que a cal provoca o rompimento da emulsão betuminosa, no entanto segundo os resultados obtidos em ensaios de módulo de resiliência, verifica-se que o cimento aumenta a rigidez da mistura fortalecendo o ligante ao contrário da cal [43].

A utilização de cimento Portland e de cal em forma de lama traduz-se também numa melhoria significativa da resistência à tração. Tal indica que uma mistura que contenha aditivos apresenta maiores valores de resistência à tração na rotura por tração indireta sob um carregamento estático, indicando ainda que estas misturas aparentam ser capazes de suportar uma maior tensão de tração antes de fissurar. Misturas recicladas que utilizam cal hidratada não apresentam um crescimento assim tão significativo relativamente à resistência à tração.

A adição de cimento Portland e de cal (quer em forma de cal hidratada ou em forma de lama) traduz-se num crescimento acentuado da estabilidade de retenção. No entanto o cimento é o que apresenta maior estabilidade devido ao papel da água na hidratação deste material. Quando o cimento tem acesso à água para completar a sua hidratação este adquire uma maior resistência.

Tanto o cimento Portland como a cal aplicado a misturas recicladas *in situ* a frio melhoram a resistência aos estragos provocados pela humidade [42]. Tal implica que a introdução de cimento Portland e de cal em misturas recicladas reduz a suscetibilidade à humidade porque são ambos agentes de adesão muito eficientes para misturas com emulsão [43].

A aplicação de cimento Portland e de cal leva a menores profundidades de deformação relativamente a situações de ausência dos aditivos referidos. Verifica-se então um aumento de resistência à deformação permanente em misturas de reciclado. No entanto o cimento Portland é o melhor aditivo para que este aumento se registe com maior significância.

De uma maneira geral, a adição de cimento Portland em pó e cal, permite aumentar a massa específica, o módulo de resiliência, a resistência à tração, e a redução do índice de vazios. Permite também aumentar a resistência aos danos provocados pela humidade e reduzir a deformação permanente e a profundidade destas deformações em misturas recicladas *in situ* [42].

6

ENSAIOS LABORATORIAIS

6.1. INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas encontrados nos projetos de reabilitação, que contemplam a reciclagem *in situ*, diz respeito à granulometria resultante da fresagem, principalmente em relação aos processos realizados sem o pré-aquecimento do revestimento, em função do aparecimento dos grumos.

Quando se trata de misturas recicladas em centrais, os grumos não são um problema, pois os que apresentarem dimensões indesejadas podem ser eliminados numa etapa inicial de peneiração.

Em processos onde as misturas são realizadas na própria pista, ou até em processos mistos, com parte do material proveniente de centrais betuminosas, o tamanho dos grumos deve ser controlado para que se obtenha melhores resultados.

Esse controlo poderia ser realizado de duas formas: pela incorporação de unidades de peneiras nos equipamentos, o que os tornaria extremamente grandes e pesados; ou por meio da construção de troços experimentais para cada obra.

Neste segundo caso, as variáveis do projeto poderiam ser corretamente determinada, isto é, poder-se-ia calibrar a velocidade da fresadora, determinar a necessidade de incorporar material de correção granulométrica e finalmente definir o tipo e quantidade de aditivo na mistura [16].

A granulometria da mistura está condicionada ao material que constitui o pavimento existente e ao processo de fresagem. Pelo facto de não ser possível seleccionar os agregados, a granulometria é considerada a maior fonte de variabilidade das misturas recicladas *in situ*. Uma vez que o agregado tem uma forte influência no comportamento da mistura, a sua distribuição deve ser controlada o máximo possível.

Pela importância desta característica, decidiu-se estudar a influência da distribuição granulométrica nas propriedades mecânicas, particularmente em misturas recicladas a frio com emulsão para aplicação em camadas bases, para numa situação de projeto se proceder corretamente à escolha do material das diferentes camadas e ao dimensionamento do pavimento.

Para alcançar o objetivo pretendido procedeu-se a um estudo laboratorial com o apoio do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (LTP) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e do Grupo Arteris, que forneceu todos os materiais utilizados nas misturas da pesquisa, com exceção da água.

6.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E JUSTIFICAÇÃO DA COMPOSIÇÃO

6.2.1 VALORES PRÉ DEFINIDOS

Os materiais envolventes na composição de uma base reciclada são o agregado, o cimento, a água e a emulsão, e portanto serão estes os componentes utilizados na construção dos provetes ensaiados.

Sendo o objetivo deste trabalho apenas estudar a influência da granulometria, teve-se de partir de valores fixos de teores de cimento e de emulsão betuminosa.

Contextualizado nas obras de reabilitação da Autoestrada Fernão Dias, o Grupo Arteris encomendou um relatório ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentação intitulado de “Avaliação laboratorial e em pista da tecnologia de reciclagem a frio *in situ* com uso de emulsão betuminosa e com cimento para reabilitação de pavimentos”. Nesse estudo, para a curva granulométrica resultante da fresagem do pavimento envelhecido, referido neste trabalho como granulometria 3, definiu-se o projeto de mistura correspondente. Este relatório foi então utilizado como base na fixação das percentagens de cimento e de emulsão.

6.2.1.1 Curva granulométrica resultante da fresagem

O material fresado, proveniente da camada de revestimento betuminoso deteriorado dos troços experimentais, foi avaliado em relação à sua distribuição granulométrica representada na figura seguinte.

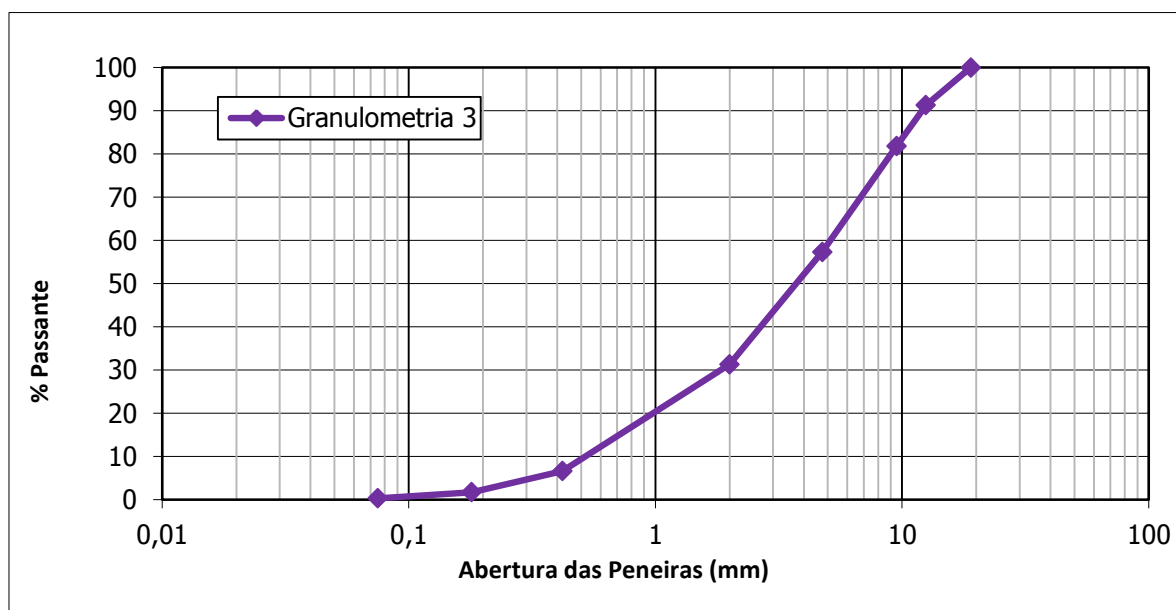


Fig.6.1 – Distribuição granulométrica do material fresado

Esta curva pode ser caracterizada segundo parâmetros normalmente utilizados para materiais naturais, como o diâmetro efetivo e o coeficiente de uniformidade.

O diâmetro efetivo é o ponto característico da curva granulométrica para medir a finura do solo, que corresponde ao ponto de 10%, tal que 10% das partículas do solo possuem diâmetros inferiores a ele. Este parâmetro fornece uma indicação sobre a permeabilidade das areias.

Para a granulometria 3 o D_{10} é 0,5mm.

Pode-se calcular o coeficiente de uniformidade para estudar a uniformidade das curvas granulométricas. Sabe-se que os solos naturais que apresentam $C_u < 5$ são denominados uniformes; e com $C_u > 15$ são não uniformes. Para valores de C_u entre 5 e 15 são denominados de medianamente uniformes. Calculando para a granulometria 3 o este coeficiente tem-se:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{5}{0,5} = 10 \quad (eq. 1)$$

Transpondo o conhecimento sobre a caracterização de solos naturais, podemos considerar que o material correspondente à granulometria 3 apresenta uma curva granulométrica medianamente uniforme.

6.2.1.2 Cimento

No estudo realizado pelo LTP, avaliou-se a influência da variação do teor de cimento nas propriedades físicas e mecânicas das misturas. Foram dosadas misturas sem cimento e com 1% e 2% de cimento para teores crescentes de água (diferentes massas específicas), para que as comparações pudessem ser feitas. Todas as misturas realizadas apresentavam 3% de emulsão, valor utilizado pela empresa Arteris na sua atividade.

Aperceberam-se de uma tendência de maior densificação das misturas que possuem cimento na sua composição e um aumento dos teores de água para um aumento da quantidade de cimento. A cura das misturas foi feita a 25°C durante 7 dias [46] e as curvas de compactação podem ser observadas na Fig.6.2.

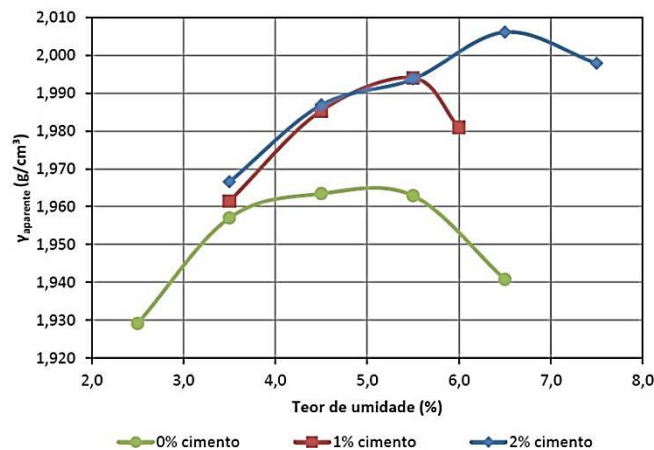


Fig.6.2 – Curvas de Compactação para as misturas com variação do teor de cimento no estudo do LTP [46]

Sobre estes provetes, realizaram ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e concluíram que os respectivos valores para as misturas sem cimento foram muito baixos, em comparação com aqueles das misturas que possuíam 1 ou 2% desse material, mostrando que o cimento eleva realmente a resistência das misturas. Percebe-se também que os provetes construídos com 2% de cimento apresentam melhores resultados, relativamente à resistência à compressão simples, do que os provetes construídos com 1% de cimento [46]. No entanto decidiu-se que para o presente trabalho se devia adotar o valor de 1% de cimento, pelas seguintes razões.

Do ponto de vista económico, o aumento do teor de cimento na mistura traduz-se num aumento dos custos de orçamento; e também pelo facto da Arteris, nos seus trabalhos de reabilitação utilizam 1% de teor de cimento, o que vem reforçar a decisão tomada.

6.2.1.3 Emulsão

A emulsão fornecida para a composição das misturas foi uma emulsão betuminosa modificada por polímero SBS (estireno-butadieno-estireno), que apresenta as características exigidas na norma DNER- EM-396/99 [46], segundo o relatório do LTP apresentado à Arteris.

Este relatório inclui uma análise da variação do teor de emulsão e sua influência nas propriedades físicas e mecânicas das misturas. O valor de projeto, utilizado pela Arteris, relativamente ao teor de emulsão nas misturas de material reciclado está fixada em 3%, então decidiram variar este teor em torno do teor utilizado em campo. Foram então dosadas misturas com 2, 3 e 4% de emulsão. A cura das misturas foi feita a 25°C durante 7 dias [46], e as respetivas curvas de compactação podem ser observadas na seguinte Fig.6.3.

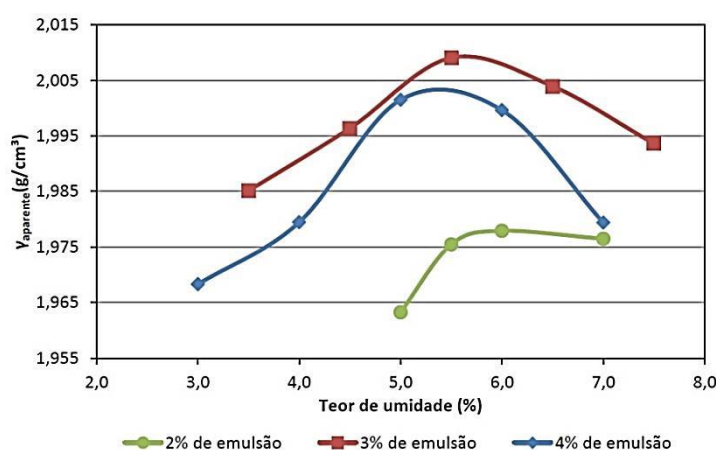


Fig.6.3 – Curvas de compactação para as misturas (energia modificada) [46]

Procedendo à comparação das curvas obtidas para os três teores de emulsão pode-se aferir que a mistura produzida com 3% foi a que produziu misturas com maiores valores de massa específica, levando à partida a provetes mais resistentes.

Após as dosagens e o período de cura, todos os provetes foram submetidos aos ensaios de compressão simples. Os resultados obtidos pelo LTP, demonstraram que à medida que se aumenta o teor de emulsão nas misturas, os valores de resistência à compressão simples tendem a diminuir [46]. Os valores referidos podem ser visualizados na Tabela 6.1 apresentada em seguida.

Tabela 6.1 – Resultados de RCS para as misturas com diferentes teores de emulsão [46]

Teor de emulsão	Teor de água (%)	Valores de RCS (MPa)
2%	4,0	0,35
	5,0	0,37
	5,5	0,39
	6,0	0,38
	7,0	0,36
	8,0	0,35
3%	3,5	0,29
	4,5	0,31
	5,5	0,35
	6,5	0,34
	7,5	0,28
4%	3,0	0,24
	4,0	0,25
	5,0	0,18
	6,0	0,27
	7,0	0,26

Segundo o Manual básico de reciclagem de betume da ARRA (2001), é recomendado que o teor ótimo de ligantes adicionais, como no caso das emulsões, varie entre 0,5 a 3,0%, para misturas que usam 100% de RAP, como neste caso [22]. Além disso, a Asphalt Academy apresenta valores coerentes com a ARRA uma vez que considera que o teor de emulsão betuminosa para misturas com RAP, não deve exceder os 3% da massa do agregado seco [34]. Com base nestas indicações bibliográficas considera-se que a utilização da percentagem de 4% de emulsão para o estudo no LTP seria dispensável. Para o presente trabalho decidiu-se estabelecer 3% de teor de emulsão na composição da mistura.

6.2.2. MATERIAL FRESADO – RAP (*RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT*)

Sendo o objetivo a percepção da influência da granulometria, optou-se por definir duas distribuições que apresentassem uma graduação bem diferenciada, visando assim resultados mais evidentes e característicos.

A definição das duas granulometrias 1 e 2 teve por base os limites da faixa A da norma de pré misturado a frio com emulsão modificada com polímero (DNER-ES 390/99). Estas faixas correspondem às tolerâncias no que diz respeito à granulometria para este tipo de misturas. A inclusão da granulometrias 1 e 2 na faixa A do DNER é apresentada na Fig.6.4. Utilizou-se esta norma por não haver no Brasil uma norma especificamente dedicada ao material para reciclagem de pavimentos envelhecidos.

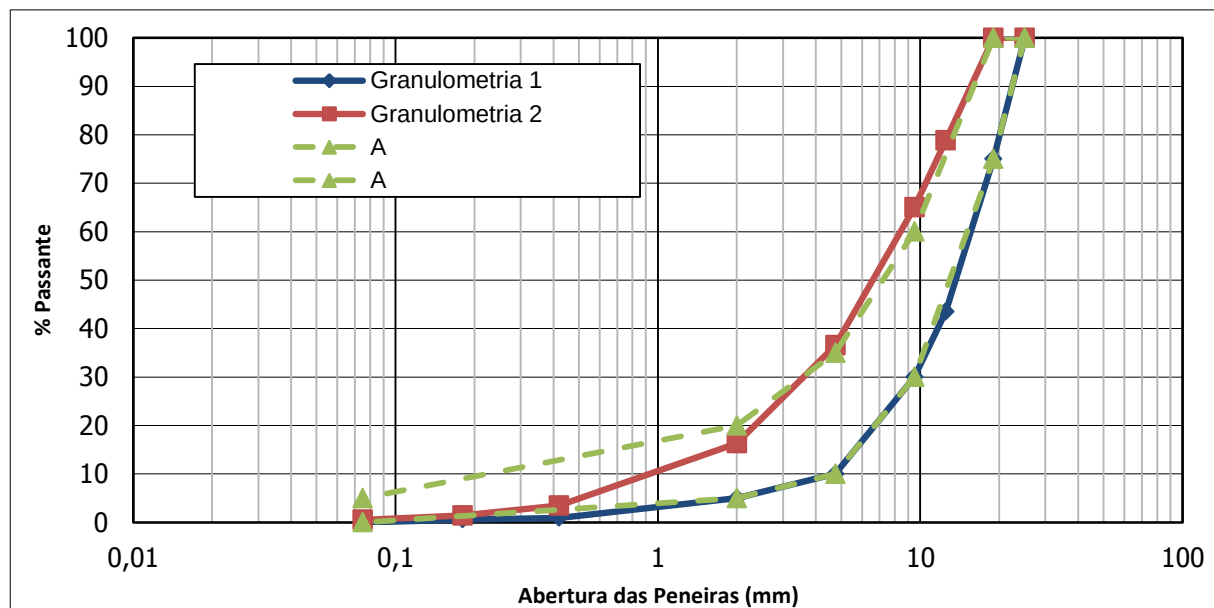


Fig.6.4 – Curvas granulométricas 1 e 2 e faixa A do DNER

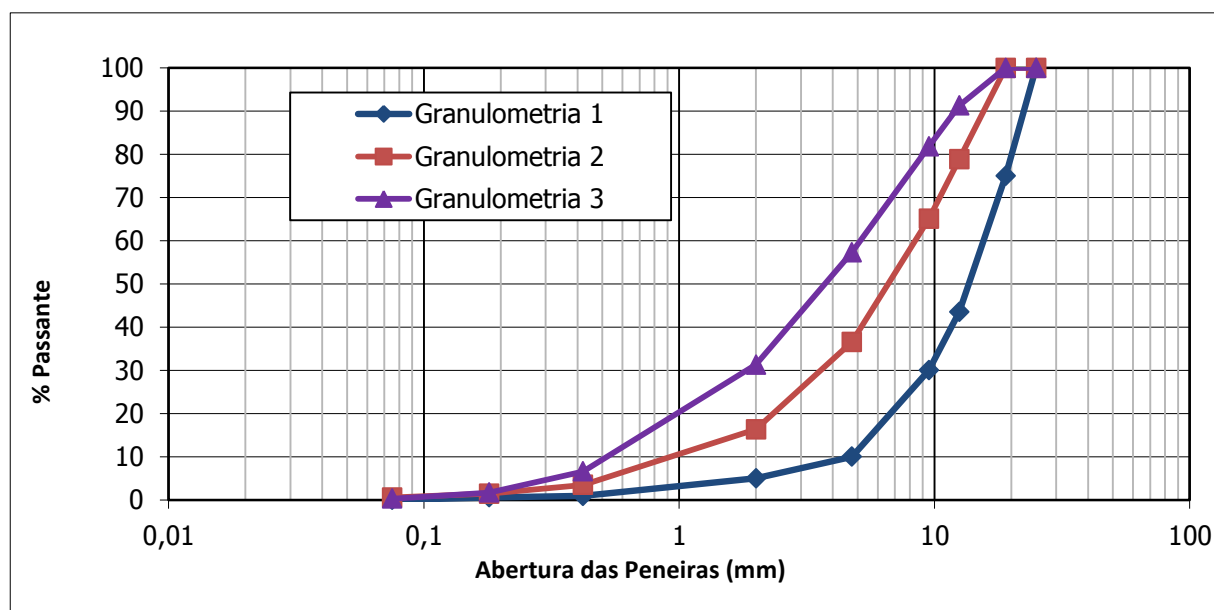


Fig.6.5 – Curvas granulométricas 1, 2 e 3

Na Fig.6.5 estão representadas as granulometrias 1 e 2 estudadas neste trabalho, e a granulometria 3 estudada no relatório desenvolvido pelo LTP, referido anteriormente. Como se pode constatar da granulometria 1 para a 3, a porcentagem de agregado fino vai aumentando e de agregado grosso diminuindo.

Da mesma forma que foi feito para a granulometria 3, pode-se verificar qual o diâmetro efetivo e calcular o coeficiente de uniformidade para as granulometrias 1 e 2, e assim tem-se:

Granulometria 1:

$$D_{10} = 4,8mm$$

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{10,5}{4,8} = 2,2 \quad (eq. 2)$$

Granulometria 2:

$$D_{10} = 1mm$$

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{8,5}{1} = 8,5 \quad (eq. 3)$$

Conclui-se então que a granulometria 1 representa um material cuja distribuição é uniforme ($Cu < 5$) e a granulometria 2 representa um material com dimensões medianamente uniforme ($5 < Cu < 15$)

Colocando por ordem crescente de uniformidade tem-se a granulometria 1, 2 e 3. Ou seja, o material com a granulometria 3 é melhor graduado do que o material com granulometria 1.

Percebe-se também que o material com distribuição granulométrica 1 é mais permeável do que a 2 e por sua vez do que a 3, uma vez que os respectivos diâmetros efetivos vão diminuindo.



Fig.6.6 – Material fresado com grumos a secar

O material fornecido para a composição das granulometrias, apresentava-se muito húmido, resultado da água aspergida pelo cilindro fresador durante a operação de fresagem. Sendo assim, o material foi colocado sobre uma lona em perfeito estado, sem furos, sobre o piso e exposto à temperatura ambiente para secagem, como se pode ver na Fig.6.6.

Após a peneiração da quantidade necessária de material, procedeu-se à composição das granulometrias, e ao seu ensacamento em sacos de plásticos com a devida identificação, como se pode observar na Fig.6.1.



Fig.6. 7 - Composição das granulometrias estabelecidas e ensacamento do material

6.2.3. ÁGUA

Para definir o teor de água da mistura final correspondente a cada granulometria, procedeu-se à construção de curvas de compactação, segundo as condições de compactação do tipo Proctor.

Na escolha dos teores de água, foi considerada a quantidade de água já presente na emulsão betuminosa. Respeitando a norma ABNT/NBR 14896:2004, referente à determinação do resíduo seco contido numa emulsão betuminosa modificada com polímero, determinou-se a percentagem de água contida neste material, utilizando duas amostras. Os resultados obtidos estão na Tabela 6.2, e como se pode verificar a quantidade média de água presente na emulsão é de cerca de 38% [46].

Tabela 6.2 - Teor de água na emulsão betuminoso utilizada

Massas	Amostras	
	1	2
Massa inicial (g)	300,00	302,10
Massa final (g)	184,80	189,10
Perda de água (%)	38,40	37,40

Foram então produzidos provetes, à temperatura ambiente, da mistura estabelecida, contendo teores fixos de cimento (1%) e emulsão (3%), justificados anteriormente, e variando o teor de água para obter as curvas de compactação das duas granulometrias. Aquele que apresentar uma massa específica aparente seca máxima corresponderá ao teor de água ótimo, valores que conduzem a uma situação de compactação mais eficiente, e portanto a um melhor comportamento da mistura. A Fig.6.8 apresenta o aspeto da mistura à medida que se adicionavam os diferentes componentes. A cura das misturas foi feita a 25°C (a fim de aproximar às condições de cura em campo) durante 7 dias.

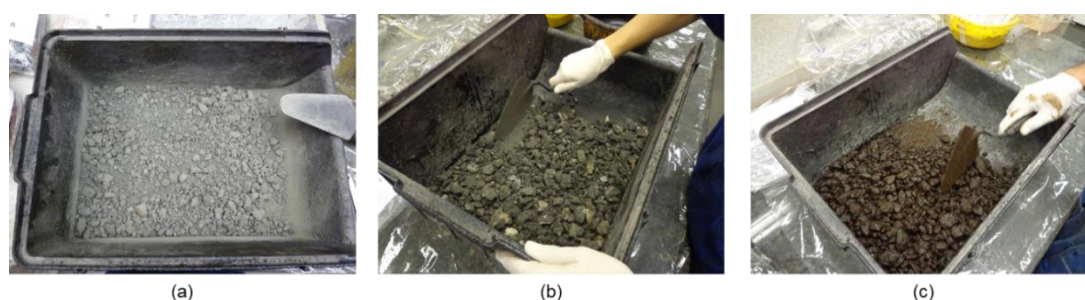


Fig.6.8 – Processo de mistura: (a) adição de cimento, (b) adição de água, (c) adição de emulsão

Nas figuras Fig.6.9 e Fig.6.10 apresentam-se as curvas de compactação das granulometrias 1 e 2 respetivamente.

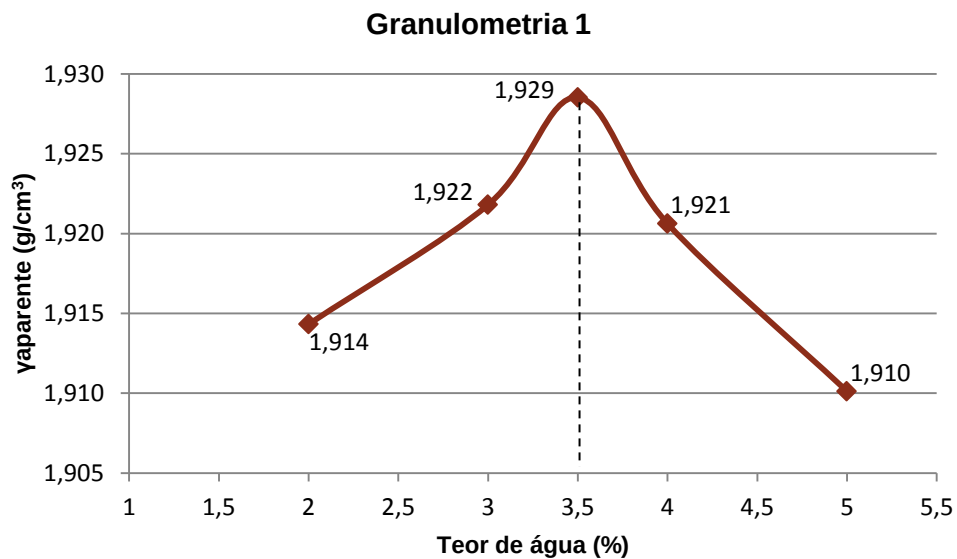


Fig.6.9 – Curvas de compactação da Granulometria 1

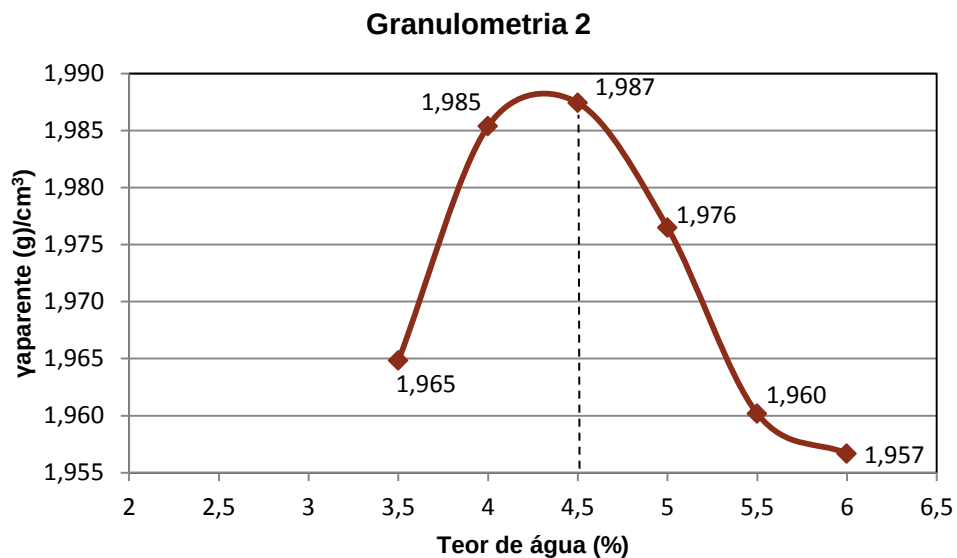


Fig.6.10 – Curva granulométrica da Granulometria 2

Como se pode constatar, o teor de água da granulometria 1 é inferior ao da granulometria 2, facto esperado pela presença de uma maior percentagem de finos, e consequentemente de um aumento da superfície específica. O teor de água ótimo, correspondente à massa específica aparente seca máxima, para a granulometria 1 é 3,5% e da 2 é igual a 4,5%, já incluindo a água presente na emulsão.

Para a curva granulométrica 3 o teor de água estabelecido foi de 5,5%. O raciocínio descrito no parágrafo anterior permanece válido para justificar o facto das misturas que incorporam a

granulometria 3 apresentarem um teor de água superior ao das granulometrias estudadas. Isto é, pela observação da respectiva curva granulométrica, este material apresenta partículas de menores dimensões que os materiais que compõem as granulometrias 1 e 2.

Na Fig.6.11 e a Fig.6.12 pode-se observar qual a aparência de provetes compactados cuja mistura contempla a granulometria 1 e 2, respectivamente.



Fig.6.11 – Três provetes com granulometria 1



Fig.6.12 – Três provetes com granulometria 2

Estes provetes foram submetidos ao ensaio de resistência à tração indireta (RT) a fim de se verificar, se a uma densificação maior das partículas corresponderia a resistências superiores. Os resultados obtidos são apresentados nas Fig.6.13 e à Fig.6.14 apresentadas a seguir.

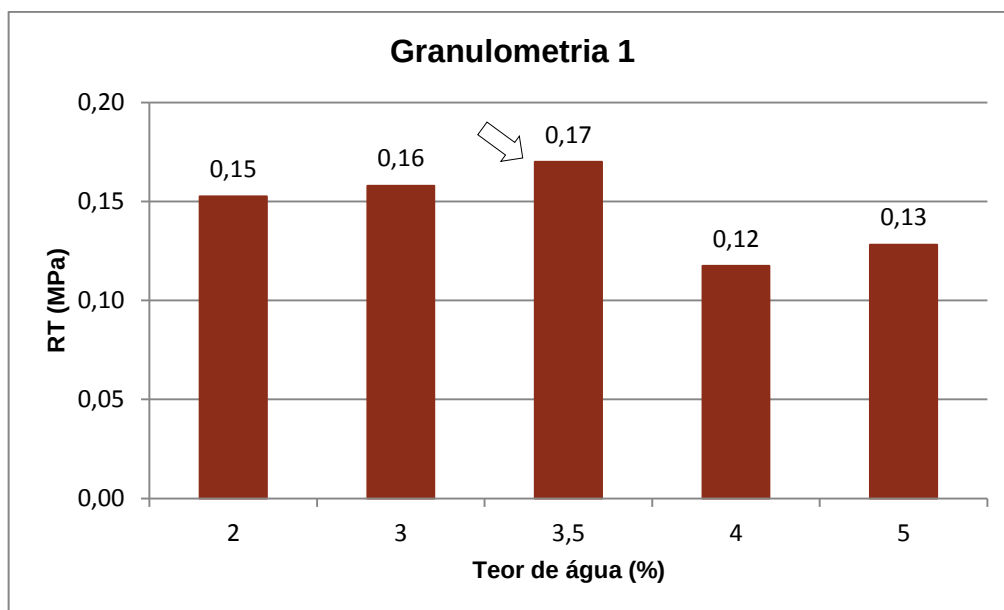


Fig.6.13 - Valores de RT para diferentes teores de água em provetes com a granulometria 1

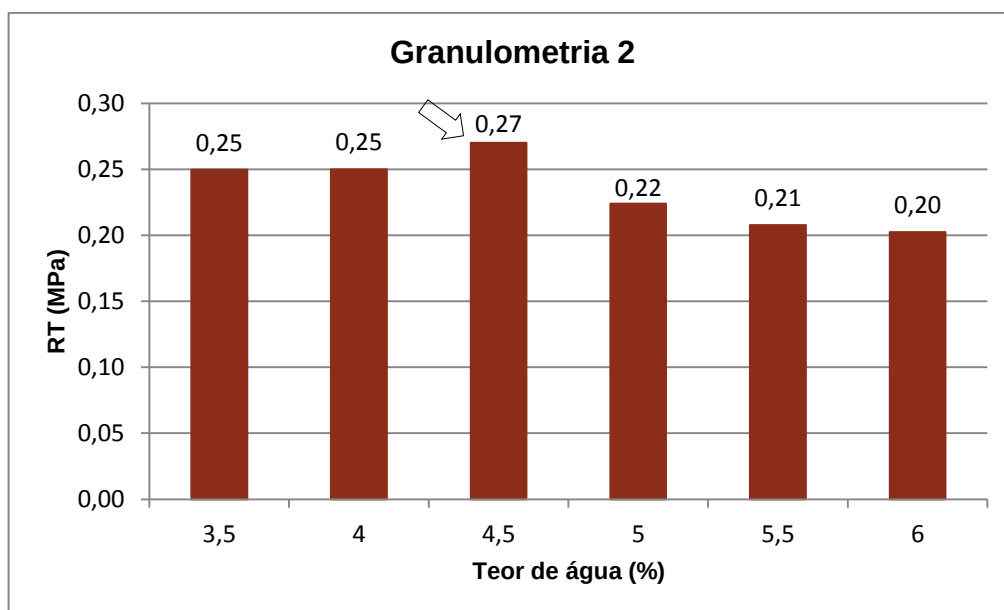


Fig.6.14 – Valores de RT para diferentes teores de água em provetes com a granulometria 2

Como se pode verificar, há uma coincidência entre as amostras que apresentam o teor de água ótimo e os que apresentam uma maior resistência à tração indireta. Desta forma, a decisão sobre o teor ótimo a que se deve compactar os provetes necessários para as fases seguintes, é reforçada.

6.3. PLANO DE ENSAIO

A primeira fase do projeto correspondeu à definição dos teores de água ótimos, processo descrito anteriormente.

Na segunda fase, a composição da mistura já está completamente definida para ambas as granulometrias. Procede-se então, utilizando uma técnica de cura acelerada, à definição dos tempos e temperaturas ótimas. Todos os provetes serão submetidos a ensaios de resistência à tração indireta, facilitando a percepção da influência da variação dos tempos e temperaturas de cura nas misturas de reciclado definidas.

Tanto na primeira como na segunda fase, os provetes são submetidos ao ensaio referido pois é o parâmetro de controlo utilizada pela Arteris como critério de projeto.

Finalmente, chegada à terceira fase proceder-se-á à mistura e moldagem dos últimos provetes. Nesta etapa os provetes irão ser submetidos aos ensaios de determinação do Módulo de Resiliência (MR), de Resistência à Compressão simples (RCS), e de Resistência à Tração Indireta (RT)

Espera-se que, seguindo o procedimento descrito, se consiga verificar qual a influência que a granulometria tem sobre as propriedades mecânicas de misturas betuminosas recicladas a frio com emulsão, objetivo que fundamentou a realização deste projeto de pesquisa.

As Tabelas 6.3, 6.4 e 6.5 permitem facilmente perceber qual o procedimento de ensaio seguido.

Tabela 6.3 – 1ª Fase

1ª Fase: definição dos teores de água ótimos				
Granulometria	Temperatura	Tempo de Cura	Nº Provetes	W _{ótimo}
1	25°C	7 dias	5	3,5
2			6	4,5

Tabela 6.4 – 2ª Fase

2ª Fase: definição da temperatura e tempo de cura acelerada ótimos				
Granulometria	Temperatura	Tempo de Cura	Nº Provetes	Ensaio
1	40°C	1 dia	3	RT
		3 dias	3	RT
		7 dias	3	RT
	60°C	1 dia	3	RT
		3 dias	3	RT
		7 dias	3	RT
2	40°C	1 dia	3	RT
		3 dias	3	RT
		7 dias	3	RT
	60°C	1 dia	3	RT
		3 dias	3	RT
		7 dias	3	RT

Tabela 6.5 – 3ª Fase

3ª Fase: verificação da influência da granulometria em propriedades mecânicas				
Granulometria	Temperatura	Tempo de Cura	Nº Provetes	Ensaio
1	Por definir	Por definir	3	MR + RCS
			3	RT
2			3	MR + RCS
			3	RT

Legenda - RT: Resistência à tração indireta; RCS: Resistência à compressão simples; MR: Módulo de resiliência.

6.4. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

6.4.1. ENSAIO PROCTOR

Executou-se o ensaio de compactação tipo Proctor na energia modificada para a mistura estabelecida.

Numa determinada fase do plano de ensaios, os provetes foram submetidos a ensaios de módulo de resiliência. Esses ensaios seguiram a norma AASHTO T307 – 99 [45], a qual refere que os provetes ensaiados devem apresentar uma relação altura diâmetro de 2:1. Então todos os provetes compactados assumirão essa relação, mesmo os que não foram submetidos a este ensaio.

Os provetes apresentavam uma altura de 20cm e um diâmetro de 10cm. Para estas dimensões e para o tipo de compactação Proctor modificado, o LTP determinou que a compactação deveria ser feita utilizando o molde e o pilão apresentados na Fig.6.15, realizando 8 camadas de 2,5 cm cada uma, com 26 pancadas por camada.



Fig.6.15 - Molde e pilão utilizados no ensaio de compactação tipo Proctor modificado

6.4.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA

Para se caracterizar a mistura quanto à sua resistência à tração (RT), realizou-se ensaios de resistência à tração indireta de acordo com a norma ASTM D6931 – 12 [47]. Decidiu-se proceder a esta

caracterização, por ser o parâmetro de projeto de dosagem de mistura utilizado pela Arteris. O ensaio de RT realizado em misturas betuminosas verifica o seu comportamento quando existe tensão de tração por flexão, em geral na fibra inferior da camada aplicada. Mesmo que a camada reciclada não esteja sobre tração, o ensaio pode mensurar, ainda que indiretamente, a coesão causada pela adição de emulsão betuminosa e o cimento que agem como um ligante de partículas [46].

A tensão de tração indireta é obtida por carregamento de um provete cilíndrico sobre o respetivo plano vertical diametral a uma velocidade de 50mm/min a uma temperatura de 25°C. Dessa forma o provete fica sujeito a tensões de tração no plano de aplicação de carga, levando-o a rotura. A força de pico relativa à rotura do provete é utilizada para calcular a tensão à tração indireta correspondente, da forma que se segue:

$$\sigma_t = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D} \quad (eq. 4)$$

Onde:

σ_t : resistência à tração indireta, KPa

P : carregamento máximo, N

t : altura do provete, mm

D : diâmetro do provete, mm [47]

Na Fig.6.16 pode-se observar o dispositivo de carregamento utilizado capaz de aplicar uma carga de compressão a uma taxa de deformação controlada enquanto mede a carga e a deformação experimentada pelo provete. Pode-se também observar os frisos entre os quais o provete está posicionado.



Fig.6.16 – Dispositivo de carregamento com frisos

Na Fig.6.17 pode-se analisar as diferentes fases do ensaio, desde o seu estado inicial até ao término do ensaio.

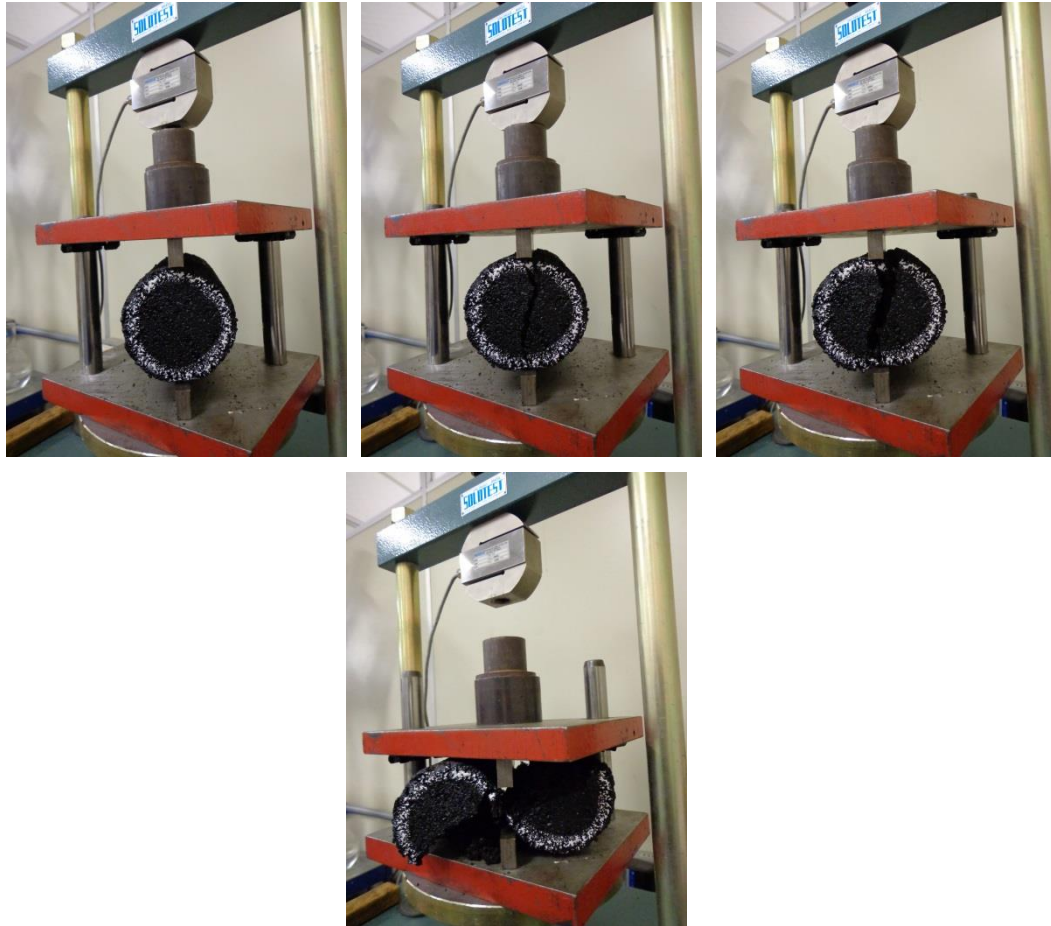


Fig.6.17 – Aspecto visual do provete durante o ensaio de resistência à tração indireta

6.4.3. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A adição de emulsão betuminosa ou de espuma de betume ao RAP não o transforma num material betuminoso. A mistura resultante mantém a natureza de uma material granular, com a diferença que apresenta melhores características comportamentais sob uma determinada solicitação [34]. Por essa razão caracterizou-se o material relativamente à sua resistência à compressão.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma D2166/D2166M – 13 [48], no qual o provete cilíndrico não confinado é carregado axialmente segundo uma taxa de deformação axial de 1mm/min a uma temperatura de 25°C. A tensão de compressão máxima é a correspondente à força de pico que provoca a rotura do provete, e é calculada da seguinte forma:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (eq. 5)$$

Onde:

P : carga aplicada, KN

A : área transversal, mm² [6]

No seguinte conjunto de fotografias (Fig.6.18) apresentadas de seguida pode-se observar as fases experimentadas pelo provete ao longo do ensaio desde do início do carregamento, passando pela rotura, até a deformação deste estabilizar. Na Fig.6.19 pode-se comparar as alturas antes e depois do ensaio.



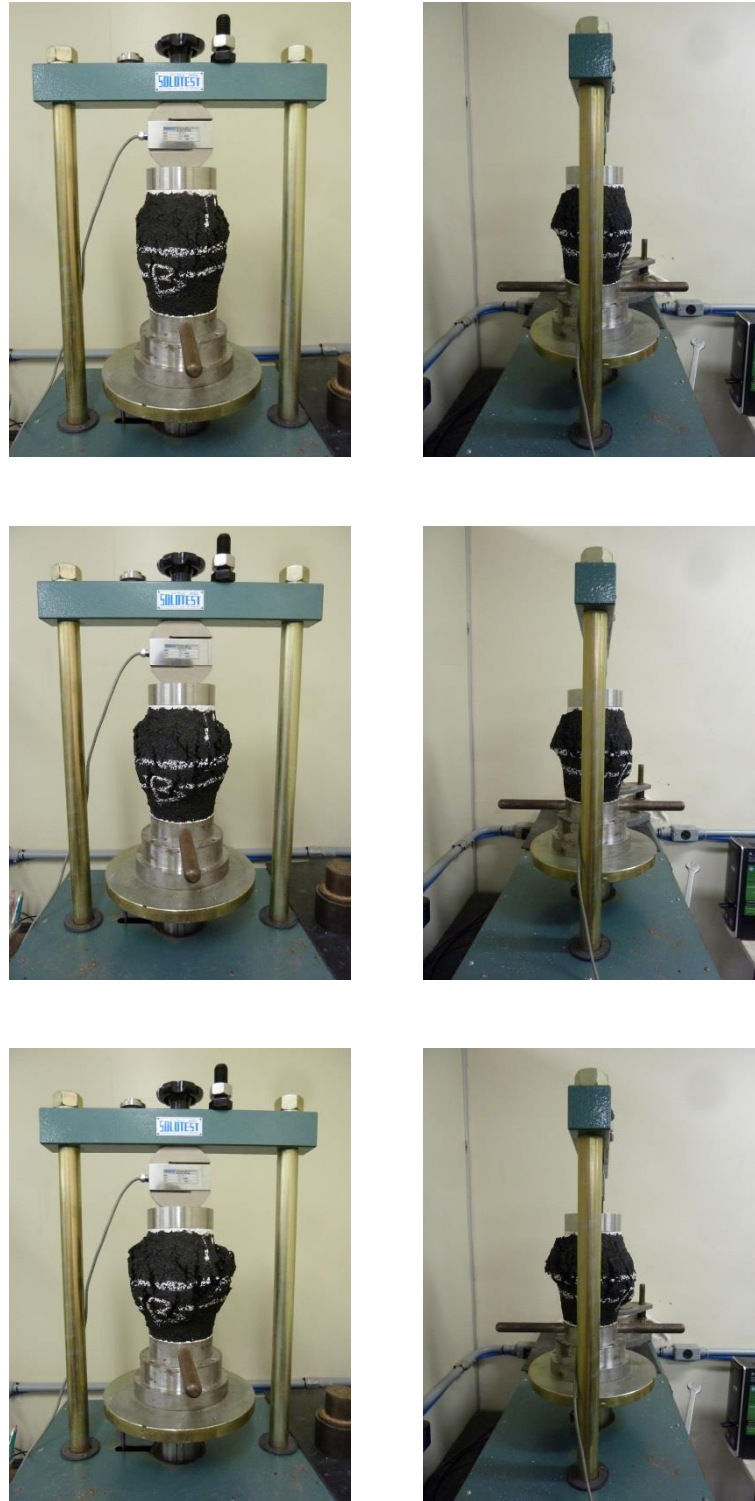


Fig.6.18 - Deformação do provete ao longo do ensaio de resistência à compressão simples



Fig.6.19 – Diferença de altura dos provetes antes e depois do ensaio

6.4.4. ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Neste ensaio, realizado à temperatura de 25°C, aplica-se uma carga cíclica axial de magnitude, duração de carregamento (0,1s) e de duração de ciclo constantes (1,0 a 3,1 s), ao provete cilíndrico. Durante o teste o provete é sujeito a uma tensão dinâmica cíclica e a uma tensão de confinamento estático proporcionada por uma câmara de pressão triaxial [45]. A Tabela 6.6 apresenta os valores da tensão de confinamento (σ_3) e a carga aplicada indicados pela norma AASHTO T307 – 99 [45].

Tabela 6.6 – Valores indicados pela norma AASHTO T307 – 99 [45]

σ_3 (MPa)	0,210			0,034			0,069			0,104			0,138		
Carga (Kgf)	15	30	45	25	50	70	50	99	149	50	75	149	75	99	199

A deformação axial resiliente (recuperável) de um provete é utilizada para calcular o módulo de resiliência da seguinte forma:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (eq. 6)$$

Onde:

MR : módulo de resiliência, MPa

σ_d : tensão cíclica axial, MPa

ϵ_r : extensão resiliente (recuperável) axial, mm/mm

O cálculo da tensão cíclica axial, ou tensão de desvio faz-se utilizando a seguinte expressão:

$$\sigma_d = \frac{P}{A} \quad (eq. 7)$$

Onde:

P : carga aplicada, KN

A : área transversal, mm² [6]

O cálculo da extensão resiliente (recuperável) axial faz-se utilizando a seguinte expressão:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_r}{t} \quad (eq.8)$$

Onde:

ϵ_r : deformação resiliente (recuperável) axial devido à tensão de desvio, mm

t : altura do provete, mm [45]

Na Fig.6.20 pode-se observar as diferentes fases de preparação do provete até à realização do ensaio de determinação do módulo de resiliência.

Como se pode verificar, na preparação do provete procedeu-se à realização de uma capa de gesso tanto na base como no topo. Tal procedimento é característico da conduta normal do Laboratório onde os ensaios foram realizados. O objetivo é evitar as deformações indevidas provenientes das irregularidades do provete. Desta forma garante-se que o provete fique aderido tanto na base quanto no topo, eliminando leituras indevidas, consideradas ruído. Como resultado tem-se a leitura referente apenas às deformações ocorridas exclusivamente devidas à aplicação da carga sobre provete.

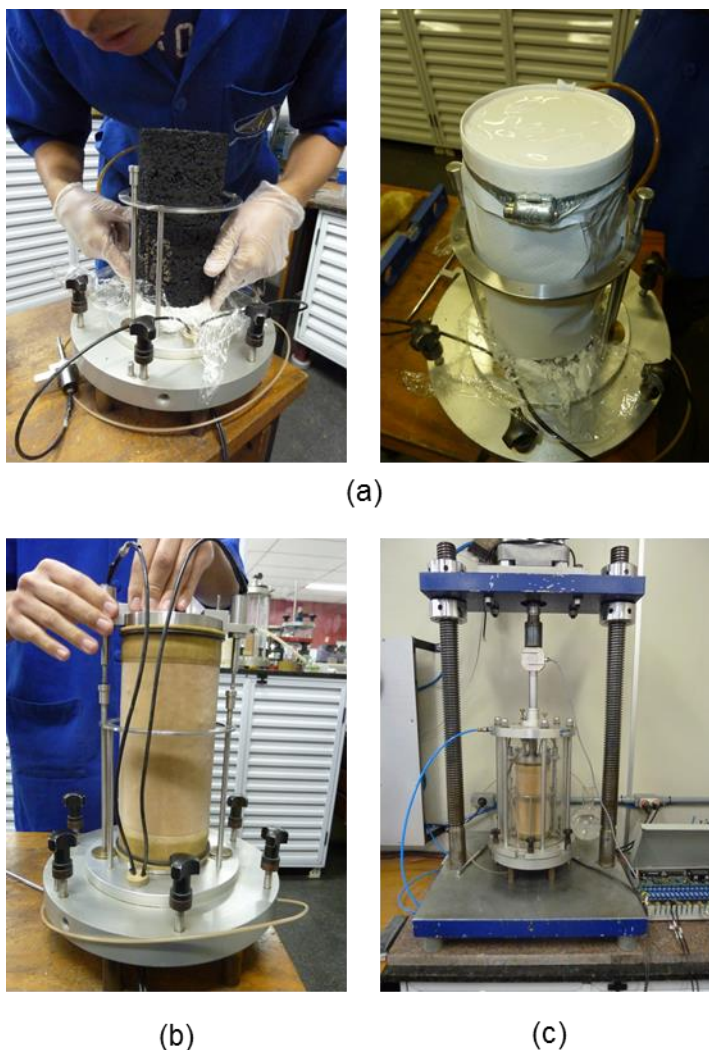


Fig.6.20 – Ensaio de determinação de MR: (a) preparação do provete, (b) colocação da membrana, (c) realização do ensaio

6.5. VARIAÇÃO DO TEMPO E TEMPERATURA DE CURA

Nesta fase da pesquisa procedeu-se à definição do tempo e temperatura de cura a que os provetes deveriam ser submetidos antes de se proceder aos ensaios finais.

Com o objetivo de acelerar o processo de cura das misturas recicladas com emulsão em laboratório, propôs-se uma técnica de cura acelerada numa tentativa de prever as propriedades mecânicas das misturas num tempo mas reduzido, visando auxiliar no projeto de misturas.

A definição de um tempo de cura acelerada é ainda um processo complexo e pouco claro, no seio da comunidade científica. Mas pode-se referir que esta técnica visa simular antecipadamente as condições que a mistura experimentará ao fim de cerca de 6 a 12 meses, ou quando as suas propriedades estabilizarem.

Considerando a contagem do tempo de cura desde que se retira os provetes dos respetivos moldes, para este trabalho adotou-se três tempos de cura diferentes de 1,3 e 7 dias, ou seja, 24 horas

(± 15 minutos), 72 horas (± 1 hora) e 168 horas (± 4 horas), para duas temperaturas diferentes, 40°C e 60°C [49]. Nesta fase procedeu-se à moldagem de 3 provetes para cada situação.

A Tabela 6.7 e a Tabela 6.8 apresenta os valores médios de massa específica seca e de resistência à tração indireta, dos provetes moldados nesta fase utilizando a granulometria 1, obtidas para cada temperatura e tempo de cura. Os valores indicam que não houve variação significativa entre amostras do mesmo grupo de misturas, uma vez que os coeficientes de variação são muito baixos, considerando que um CV abaixo de 25% corresponde a um valor razoável.

Tabela 6.7 – Valores médios da massa específica seca média para as diferentes configurações para a granulometria 1

Temperatura	Tempo de cura	Desvio Padrão (g/cm ³)	Massa específica seca média (g/cm ³)	CV (%)
40°C	1 dia	0,00	1,94	0,14
	3 dias	0,01	1,97	0,28
	7 dias	0,01	2,00	0,47
60°C	1 dia	0,04	1,95	1,87
	3 dias	0,01	1,93	0,74
	7 dias	0,00	1,92	0,12

Tabela 6.8 – Valores médios de resistência à tração indireta (RT) para a granulometria 1

Temperatura	Tempo de cura	Desvio Padrão (MPa)	RT média (MPa)	CV (%)
40°C	1 dia	0,01	0,11	4,61
	3 dias	0,01	0,19	7,72
	7 dias	0,02	0,22	7,08
60°C	1 dia	0,00	0,18	0,37
	3 dias	0,00	0,25	1,37
	7 dias	0,02	0,25	7,26

Na Fig.6.21 apresenta-se os valores obtidos nos ensaios realizados referentes à resistência à tração indireta. Os valores médios desta resistência com as barras de erro exibidas nesta figura reforçam a não variabilidade dos valores dentro do mesmo grupo de amostras. Pela observação desta figura pode-se concluir, que para as propriedades mecânicas dos provetes com a granulometria 1 estabilizarem, estes devem ser submetidos a um processo de cura de 7 dias a 60°C.

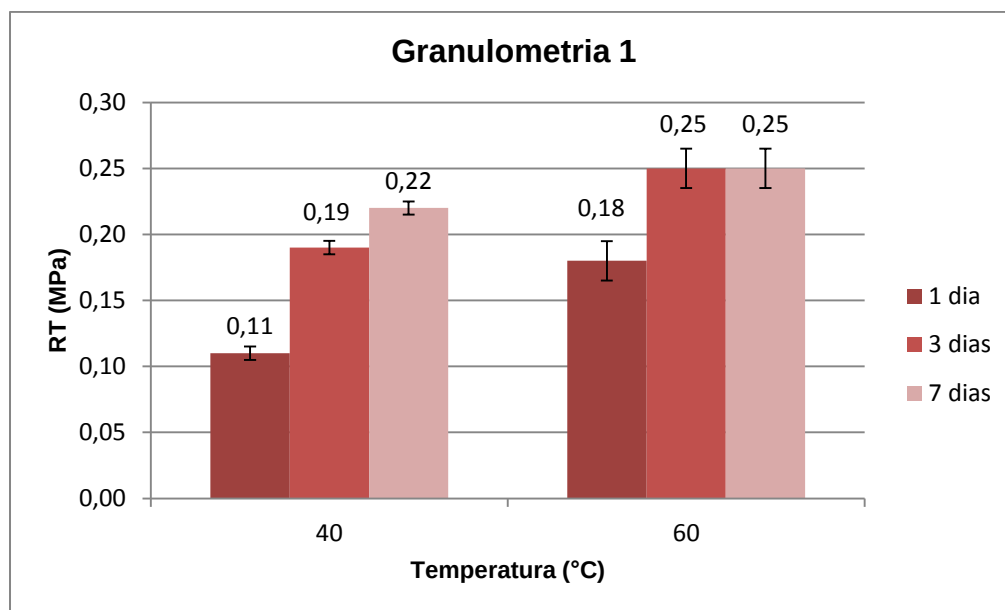


Fig.6.21 – Valores médios de resistência à tração indireta em função do tempo e da temperatura de cura, utilizando a granulometria 1

A Tabela 6.9 e a Tabela 6.10 apresentam os valores médios de massa específica seca e de resistência à tração indireta, dos provetes moldados nesta fase utilizando a granulometria 2, obtidas para cada temperatura e tempo de cura. Os valores indicam que, assim como para a granulometria 1, não houve variação significativa entre amostras do mesmo grupo de misturas.

Tabela 6.9 - Valores médios da massa específica seca média para as diferentes configurações para a granulometria 2

Temperatura	Tempo de cura	Desvio Padrão (g/cm ³)	Massa específica seca média (g/cm ³)	CV (%)
40°C	1 dia	0,01	2,02	0,52
	3 dias	0,01	2,00	0,46
	7 dias	0,01	2,00	0,46
60°C	1 dia	0,01	2,00	0,46
	3 dias	0,01	1,98	0,48
	7 dias	0,00	2,00	0,11

Tabela 6.10 - Valores médios de resistência à tração indireta (RT) para granulometria 2

Temperatura	Tempo de cura	Desvio Padrão (MPa)	RT média (MPa)	CV (%)
40°C	1 dia	0,01	0,12	5,56
	3 dias	0,01	0,19	7,46
	7 dias	0,01	0,26	2,03
60°C	1 dia	0,02	0,18	9,30
	3 dias	0,02	0,34	4,91
	7 dias	0,01	0,36	1,58

Na Fig.6.22 apresenta-se os valores obtidos nos ensaios realizados referentes à resistência à tração indireta. Os valores médios desta resistência, com as barras de erro exibidas nesta figura, reforçam a não variabilidade dos valores dentro do mesmo grupo de amostras utilizando a granulometria 2.

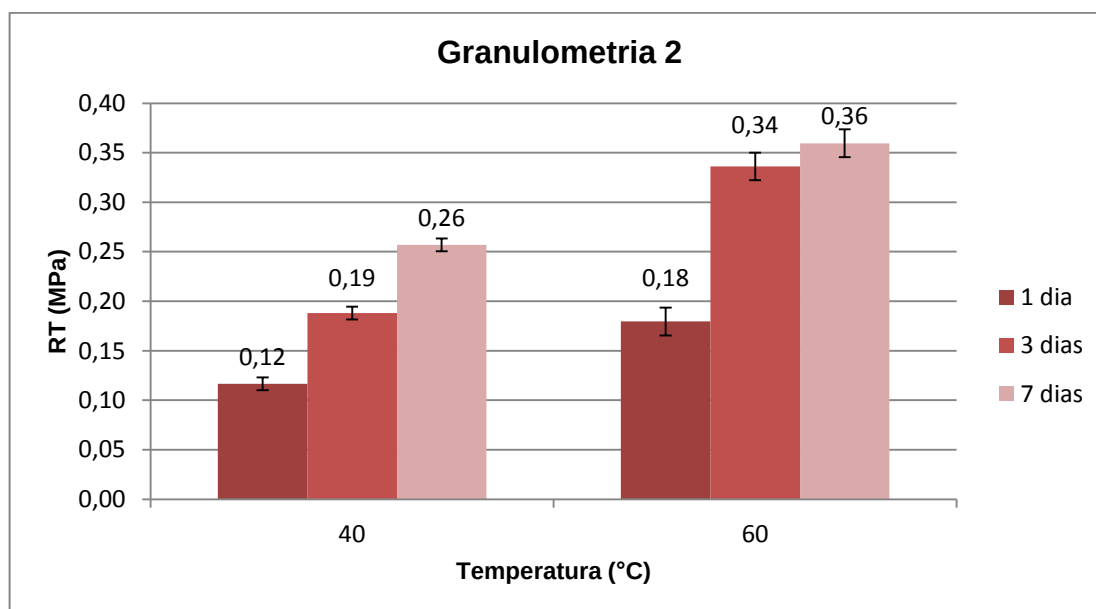


Fig.6.22 - Valores médios de resistência à tração indireta em função do tempo e da temperatura de cura, utilizando a granulometria 2

Pela observação da figura anterior verifica-se que, tal como na situação em que se utiliza a granulometria 1, para as propriedades mecânicas dos provetes com a granulometria 2 estabilizarem, estes devem ser submetidos a um processo de cura de 7 dias a 60°C.

Através da comparação da Fig.6.21 com a Fig.6.22 pode-se verificar que apenas com uma cura a 60°C é que as diferenças dos valores de resistência à tração atingidos pelos provetes com granulometria 1 em relação aos provetes com granulometria 2, é que se tornam evidentes. Desta forma conclui-se que com uma granulometria do tipo 2, ou seja mais bem graduada, consegue-se atingir valores finais de resistência à tração superiores em relação a provetes construídos com uma granulometria do tipo 1.

6.6. VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA EM PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para cada granulometria ensaiou-se três provetes para determinação do Módulo de resiliência triaxial, e à resistência à compressão simples. Tal é possível, uma vez que o primeiro é um ensaio não destrutivo. Com este último procedimento, tem-se já toda a informação necessária para aferir sobre a influência da granulometria sobre propriedades mecânicas de misturas recicladas com emulsão betuminosa.

A Tabela 6.11 diz respeito aos valores médios de massa específica seca do grupo de seis provetes compactados utilizando as duas granulometrias em estudo. Mais uma vez, para cada grupo não se verifica quase nenhuma variabilidade dos resultados, para este parâmetro.

Tabela 6.11 - Valores médios da massa específica seca média para as diferentes configurações para a granulometria 1 e 2

Granulometria	Desvio Padrão (g/cm ³)	Massa específica seca média (g/cm ³)	CV (%)
1	0,02	1,96	0,78
2	0,01	2,01	0,31

Resistência à Compressão Simples

A Tabela 6.12 apresenta os valores de resistência à compressão simples para cada provete ensaiado; apresenta também os valores médios relativos a esta resistência, os quais indicam não haver uma variabilidade significativa, validando, mais uma vez, os resultados obtidos.

Tabela 6.12 - Valores de resistência à compressão simples e os respectivos valores médios, para as granulometrias 1 e 2

	RCS (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	RCS média (MPa)	CV (%)
Granulometria 1	0,38	0,02	0,40	3,91
	0,42			
	0,41			
Granulometria 2	0,50	0,01	0,50	1,31
	0,50			
	0,51			

A Fig.6.23 representa graficamente a informação da Fig.6.23, confirmando a não variabilidade dos resultados referentes a cada grupo de ensaio, pela presença das barras de erro.

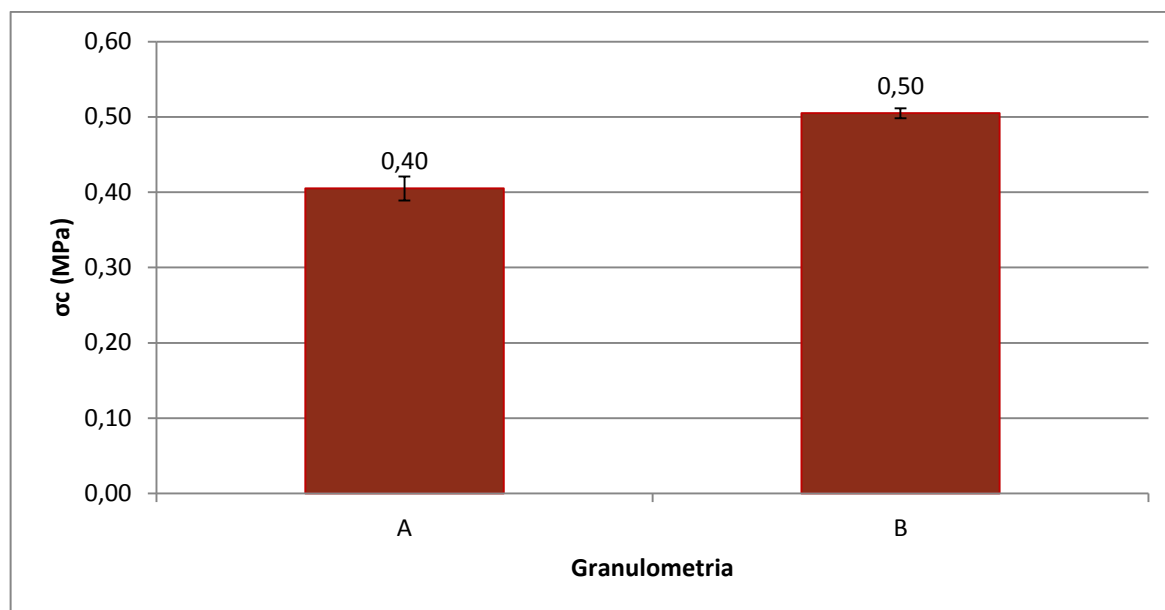


Fig.6.23 - Valores de resistência à compressão simples para a granulometria 1 e 2

Pode-se afirmar que provetes cuja mistura contempla uma granulometria bem graduada apresentam uma resistência à compressão simples bem superior em comparação a misturas cuja granulometria apresenta uma maior uniformidade.

Resistência à Tração Indireta

A Tabela 6.13 apresenta os valores da resistência à tração indireta dos provetes ensaiados na segunda fase referentes ao grupo de ensaios subtido à cura de 7 dias a 60°C; apresenta também os valores médios relativos a esta resistência, os quais indicam não haver uma variabilidade significativa, validando assim os resultados obtidos.

Tabela 6.13 - Valores de resistência à tração indireta e os respectivos valores médios, para a granulometria 1 e 2

	RT (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	RT média (MPa)	CV (%)
Granulometria 1	0,28	0,02	0,25	7,26
	0,24			
	0,24			
Granulometria 2	0,37	0,01	0,36	1,58
	0,35			
	0,36			

A Fig.6.24 representa graficamente a informação da Tabela 6.13, confirmando a não variabilidade dos valores de resistência à tração indireta obtidos em laboratório, pela presença das barras de erro.

Na Fig.6.24 foi também inserido o valor referente à resistência à tração indireta de provetes construídos com a granulometria 3, submetidos igualmente a 7 dias de cura a 60°C. Seria interessante

apresentar neste trabalho valores das três propriedades estudadas referentes à granulometria 3. No entanto tal não foi concretizado, portanto é apresentado o valor disponível, numa perspectiva de completar e reforçar o estudo pretendido.

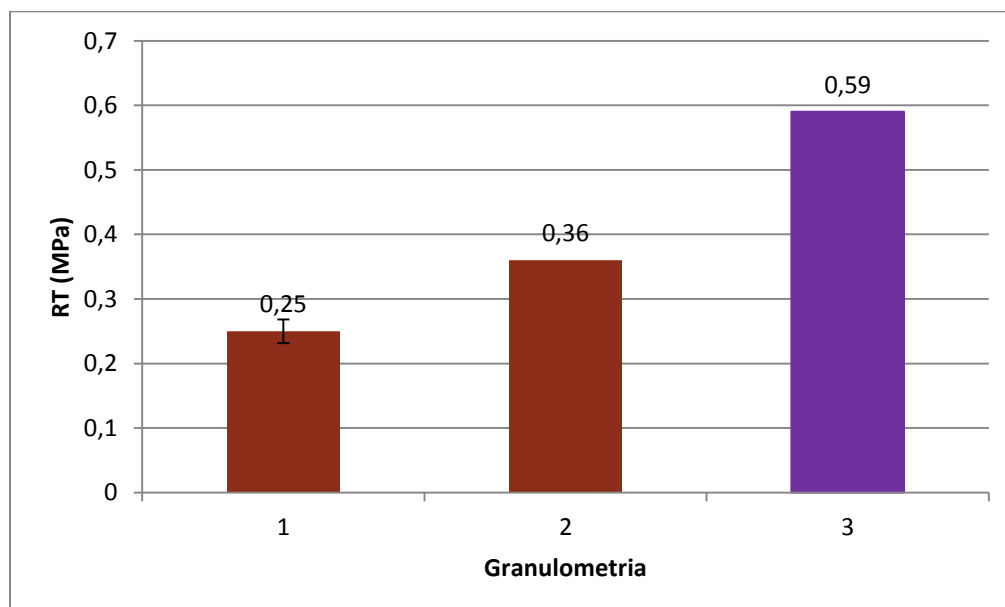


Fig.6.24 - Valores de resistência à tração indireta para a granulometria 1, 2 e 3

Perante os resultados apresentados pode-se definir um padrão relativamente à preferência na utilização de granulometrias melhores graduadas sobre granulometria mais uniformes. Quer nos resultados referentes aos ensaios de resistência á compressão simples quer nos ensaios de resistência à tração indireta, relativamente às granulometrias 1 e 2, a segunda apresenta valores superiores face à primeira.

Observando totalmente apenas a Fig.6.24 esta conclusão é reforçada, uma vez que o valor da resistência à tração indireta aumenta com a diminuição da uniformidade granulométrica.

Módulo de Resiliência

Todas as amostras foram então submetidas ao ensaio de determinação de módulo de resiliência para verificar a rigidez do material reciclado tendo em conta a utilização das duas granulometrias em estudo.

A Tabela 6.14 expõe os resultados obtidos para cada tensão de confinamento que os diferentes provetes experimentaram, e os respetivos valores médios. Com coeficientes de variância sempre abaixo de 25%, os valores de módulo de resiliência não se apresentam muito dispersados para provetes do mesmo grupo de ensaio.

Tabela 6.14 - Valores de módulo de resiliência e os respectivos valores médios, para a granulometria 1 e 2

	1			2		
σ_3 (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	MR médio (MPa)	CV (%)	Desvio Padrão (MPa)	MR médio (MPa)	CV (%)
0,021	84,68	2221,53	3,81	252,49	2327,97	10,85
0,034	121,29	2187,81	5,54	207,97	2210,61	9,41
0,069	77,60	2084,91	3,72	106,55	2234,29	4,77
0,104	135,90	2276,08	5,97	106,14	2437,90	4,35
0,138	119,81	2310,94	5,18	157,15	2384,95	6,59

A Fig.6.25 e Fig.6.26 a apresentam graficamente os resultados de módulo de resiliência dos três provetes ensaiados para cada tensão de confinamento, assumindo a granulometria 1 e 2 respectivamente.

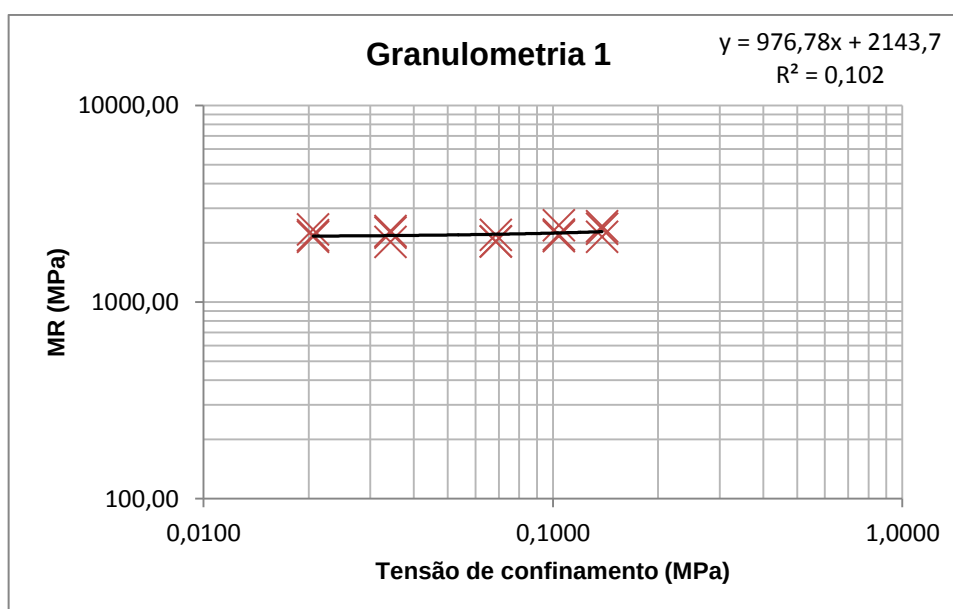


Fig.6.25 - Valores de módulo de resiliência para a granulometria 1

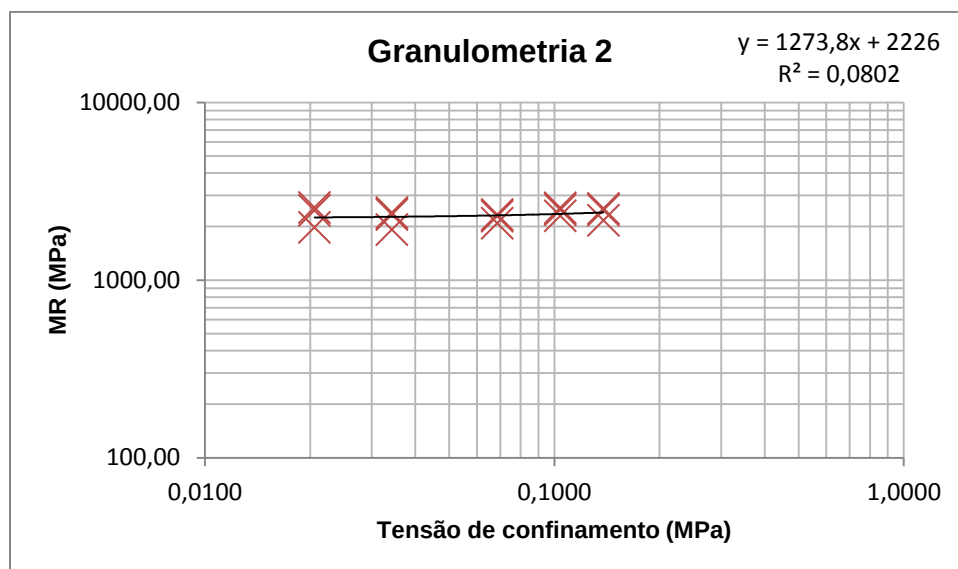


Fig.6.26 - Valores de módulo de resiliência para a granulometria 2

Como se pode constatar, para os diferentes valores de tensão de confinamento, os resultados obtidos foram bastante semelhantes, para ambas as granulometrias. Tal facto leva a crer que o módulo de resiliência dos materiais não depende da dimensão das partículas que os constituem.

7

CONCLUSÕES

Todas as conclusões deste trabalho baseiam-se na análise de resultados de ensaios realizados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, segundo o plano de pesquisa previamente apresentado.

O principal objetivo da pesquisa é determinar qual a influência que o parâmetro granulometria tem sobre algumas propriedades mecânicas de misturas que contemplam material proveniente de ações de fresagem de pavimentos envelhecidos, seguindo a metodologia de reciclagem a frio com o uso de emulsão betuminosa.

Todos os valores obtidos foram sujeitos a análise e um tratamento adequado, resultando nas tabelas e gráficos apresentados no capítulo 6.

Na 1ª fase construiu-se as curvas de compactação referentes a cada granulometria e determinou-se os respectivos valores percentuais ótimos de água. Como esperado a granulometria com o diâmetro efetivo maior apresentou um teor de água ótimo superior. Tal acontece pois esta granulometria, apresenta uma superfície específica superior, e por isso precisa de mais água para a lubrificação das partículas presentes na mistura.

Utilizando a cura acelerada descrita no capítulo anterior, conclui-se que independentemente da granulometria, as misturas apresentam maiores valores de resistência à tração com tempos e temperaturas de cura maiores. Os provetes submetidos à temperatura de 60°C durante sete dias de cura apresentaram os maiores resultados para as duas granulometrias.

Percebe-se que a metodologia de cura acelerada é um bom artifício para a concepção de projetos de misturas recicladas a frio com emulsão. Verifica-se que para ambas as granulometrias, para uma temperatura de 60°C, os valores de resistência à tração indireta não variaram muito passando de 3 dias de cura para 7 dias de cura, pois apresentam valores iguais para a granulometria 1 e valores muito próximos para a granulometria 2. Neste último caso, verifica-se que as diferenças correspondentes aos dois períodos de cura, para a temperatura referida, estavam dentro do desvio padrão obtido, sugerindo assim que, do ponto de vista estatístico, podem ser considerados valores semelhantes.

Após a construção dos provetes, sob uma perspectiva visual, foi possível verificar que as misturas que utilizam a granulometria 1 apresentam mais vazios do que os que utilizam a granulometria 2, mostrando-se coerente com o facto da primeira ser uma granulometria mais uniforme que a segunda e por isso apresenta um pior arranjo das partículas, e assim uma menor compacidade.

Conclui-se que uma mistura com granulometria menos uniforme e com uma maior fração de finos apresenta uma maior resistência à tração indireta.

Esta situação pode ser resultado do facto da fração grossa, por ser a fração mais relevante da granulometria 1, define o comportamento mecânico da mistura. Deste modo a mistura reciclada comporta-se de forma semelhante a um material granular com baixa coesão, e assim não resistindo à tração. A granulometria 2, como apresenta uma maior compacidade e uma percentagem de finos superiores à granulometria 1, exhibe melhor coesão entre partículas o que permite atingir uma maior resistência à tração relativamente a misturas com granulometrias com compacidades inferiores.

Uma conclusão semelhante pode ser verificada em relação aos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão simples. A mistura com a granulometria 2 apresenta maior resistência a estes esforços. Esta situação é atribuída ao facto dos provetes com esta granulometria apresentarem menos vazios, o que significa um melhor arranjo de partículas permitindo obter uma maior compacidade da mistura do que os provetes que assumiram a granulometria 1.

Seriam de esperar valores de resistência à compressão bastante superiores aos valores de resistência à tração. No entanto, estas resistências apresentam valores relativamente próximos. Esta situação deve-se ao facto de as velocidades de ensaio não terem sido as mesmas, pois a norma utilizada para os ensaios de resistência à tração indireta refere-se a misturas betuminosas e a norma utilizada para os ensaios de resistência à compressão simples refere-se a solos granulares, devido a falta de métodos de ensaios específicos para as misturas recicladas a frio com emulsão.

Relativamente aos resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência triaxial, verifica-se que o comportamento dos provetes de mistura reciclada a frio com emulsão não foi influenciado pela tensão confinante, independentemente da granulometria. Dessa forma pode-se afirmar que uma camada construída com este tipo de mistura não se comportaria como um material granular, e sim como uma mistura betuminosa a frio. Apesar disso, os seus valores são considerados bons. O Módulo de Resiliência (MR) esperado para misturas recicladas a frio com emulsão varia em torno de 1.400 a 1.700MPa, após a cura completa da emulsão asfáltica [50]. Os valores obtidos em laboratório são valores mais próximos dos característicos para revestimentos betuminosos. Misturas betuminosas, utilizadas em revestimentos de pavimentos, apresentam módulos de resiliência que podem variar entre 2.000 a 8.000MPa, sendo os menores correspondentes a misturas com betumes modificados por polímeros ou por borracha e os maiores a misturas com betumes de consistência dura [10]. A granulometria das misturas, juntamente com o volume de vazios, também tem forte influência nos resultados de módulo de resiliência das misturas betuminosas.

Apesar do material reciclado, por natureza, apresentar uma certa variabilidade do seu comportamento mecânico, o que levanta muitas dúvidas relativamente aos parâmetros de dimensionamento, a sua utilização é uma boa alternativa aos materiais convencionais. Além das vantagens ambientais e económicas já descritas, este material apresenta um bom comportamento mecânico, apresentando-se como uma solução viável na reabilitação de pavimentos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Nações Unidas. *World Population Prospects: The 2012 Revision*. 2012. <http://esa.un.org/wpp/>. 20/03/2014
- [2] Ban Ki-moon. *Mensagem do Secretário geral para o Dia Internacional do Habitat*. 7 de Outubro de 2013. <http://www.unric.org/pt/mensagens-do-secretario-geral/31263-mensagem-do-secretario-geral-para-o-dia-internacional-do-habitat-7-de-outubro-de-2013>. 20/03/2014
- [3] Centro de Notícias da ONU. *Funcionário da ONU descreve os desafios que as cidades enfrentam perante a rápida urbanização*. 3 de Novembro de 2010 <http://www.unric.org/pt/actualidade/29720-funcionario-da-onu-descreve-os-desafios-que-as-cidades-enfrentam-perante-a-rapida-urbanizacao>. 20/03/2014.
- [4] Agência Portuguesa do Ambiente. *Resíduos de Construção e Demolição*. 2014. <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=197&sub3ref=283>. 20/03/2014.
- [5] Balbo, José Tadeu. *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração*. Oficina de Textos, São Paulo, 2007.
- [6] Balbo, José Tadeu. *Pavimentos asfálticos: patologias e manutenção*. Editora Plêiade, São Paulo, 1997
- [7] Tseng, Ester. *Reciclagem total de pavimentos de concreto com agregados para construção de novos pavimentos de concreto: o caso do rodometropolitano Mário Covas*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- [8] The Freedonia Group. *World Construction Aggregates - Industry Study with Forecasts for 2013 & 2018*. Dezembro 2009, 8 páginas, The Freedonia Group, Cleveland.
- [9] Costa, C., Pinto, S. *O Uso de Reciclagem de pavimentos como alternativa para o desenvolvimento sustentável em obras rodoviárias no Brasil*. Revista Engenharia, Edição 602/2011, 7 páginas, Engenho Editora Técnica, LTDA, São Paulo.
- [10] Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*, 3ª edição, 2010. Petrobras: ABEDA, Rio de Janeiro, 2006.
- [11] Antunes, Maria de Lurdes. *Exigências Funcionais e Estruturas dos pavimentos rodoviários*. Ação de Formação: Conservação de Reabilitação de Pavimentos Rodoviários, 25 de Novembro de 2005, 31 páginas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [12] Wirtgen GmbH. *Manual de Reciclagem a Frio*, 2ª edição Novembro 2004. Wirtgen Group, 1998, 258 páginas, Windhagen.
- [13] Fontul, Simona. *Caracterização do Estado dos pavimentos rodoviários*. Ação de Formação: Conservação de Reabilitação de Pavimentos Rodoviários, 25 de Novembro de 2005, 31 páginas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [14] Antunes, Maria de Lurdes. *Seleção de técnicas de conservação de edifícios*. Ação de Formação: Conservação de Reabilitação de Pavimentos Rodoviários, 25 de Novembro de 2005, 31 páginas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [15] Batista, Fátima. *Novas técnicas de reabilitação*, Ação de Formação: Conservação de Reabilitação de Pavimentos Rodoviários, 25 de Novembro de 2005, 31 páginas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

- [16] Bonfim, Valmir. *Estudo da granulometria resultante da fresagem de revestimentos asfálticos com vista à reciclagem “in situ” a frio*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.
- [17] Wirtgen GmbH. *Wirtgen cold milling manual: Technology and application*. Wirtgen Group, 244 páginas, Windhagen, 2013
- [18] “Cold Recycling”, Wirtgen Cold Recycling Technology, Wirtgen GmbH, 3rd Edition, 2010. apud Tebaldi, Gabriele et al. *Classification of Recycled Asphalt (RA) Material*. 2nd International Symposium on Asphalt Pavement and Environment, 2012, France, 14 páginas, The International Society for Asphalt Pavements.
- [19] “FAYAT Recycling Manual”, FAYAT Group, France (2007) apud Tebaldi, Gabriele et al. *Classification of Recycled Asphalt (RA) Material*. 2nd International Symposium on Asphalt Pavement and Environment, 2012, France, 14 pag., The International Society for Asphalt Pavements.
- [20] “Maintenance Technical Advisory Guide (MTAG) Volume I - Flexible Pavement Preservation Second Edition”, Chapter 13 – In-place Recycling, California department of Transportation (CALTRANS), 2008, apud Tebaldi, Gabriele et al. *Classification of Recycled Asphalt (RA) Material*. 2nd International Symposium on Asphalt Pavement and Environment, 2012, France, 14 pag., The International Society for Asphalt Pavements.
- [21] Tebaldi, G. et al. *Classification of Recycled Asphalt (RA) Material*. 2nd International Symposium on Asphalt Pavement and Environment, 2012, France, 14 pag., The International Society for Asphalt Pavements.
- [22] ARRA, Asphalt Reclaiming and Recycling Association. *Basic Asphalt Recycling Manual*. 269 páginas, 2001.
- [23] Santos, P. S. *Tecnologia de argilas: Aplicações*. São Paulo: Edgard Blucher, 1975. V.2; apud Motta, R. S. *Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil para a aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- [24] Lima, J. A. R. *Proposição de diretrizes para a produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999; apud Motta, R. S. *Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil para a aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- [25] Lund, A. B.; Sampaio, J. A.; Almeida, S. L. M. *Tratamento de minérios*. 4ed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2004. 867p; apud Motta, R. S. *Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil para a aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- [26] Schneider, D. M. *Deposição irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo*. 2003. 130p. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003; apud Motta, R. S. *Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil para a aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- [27] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Coque>. 24/07/2014

- [28] Coutinho, Joana de Sousa. *Ligantes*. Bibliografia apresentada na disciplina de Materiais de construção 2 – 1ª parte, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [29] DECRETO-LEI nº178/2006. D.R. I Série.171 (05-09-2006) 6526-6545
- [30] Coutinho, Joana de Sousa. *Valorização dos resíduos de construção e demolição*. Bibliografia apresentada na disciplina de Materiais de construção 1, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [31] INIR, Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias IP. Construção e Reabilitação de Pavimentos – Reciclagem de Pavimentos, 51 pág.
- [32] Fonseca, Paulo. *Reciclagem de pavimentos rodoviários*. RECIPAV – Engenharia e Pavimentos, Lda. 15pág
- [33] Ribeiro, Jaime Manuel Queirós. *II Jornadas Técnicas de Pavimentos: Reciclagem a frio com espuma betume*. FEUP Edições, Porto, 2003
- [34] Asphalt Academy. *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials*, 2ª edição, Maio de 2009, 148 páginas.
- [35] ABEDA. *Manual Básico de Emulsões Asfálticas*, 2ª edição. ABEDA, Rio de Janeiro, 2010
- [36] <http://www.aema.org/?s=combination>. 27/07/2014
- [38] Instituto da Construção. *Conceção/dimensionamento de Pavimentos Rodoviários*, Maio de 1993
- [39] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Hulha>. 31/05/2014
- [40] Asphalt Institute. *A Basic Asphalt Emulsion Manual*, Serie nº 19, 2ª edição, 230 páginas, EUA,
- [41] *Les Emulsions de bitume et leurs applications routières*. Syndicat des fabricants d'émulsions routières de bitume. Paris, 1976.
- [42] Niazi Y., Jalili M. *Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion*. Elsevier, 16/09/2008, 6 páginas.
- [43] Brown SF, Needham D. A study of Portland cement modified Bitumen emulsion mixtures. 2000 encontro anual da AAPT.
- [44] http://www.ctb.com.pt/?page_id=866. 21/07/2014
- [45] AASHTO T307-99. 1999, Determining the Resilient Modulus of soils and Aggregate Materials
- [46] *Avaliação laboratorial e em pista da tecnologia de reciclagem a frio in situ com uso de emulsão asfáltica e com cimento para reabilitação de pavimentos*. Autopista Fernão Dias – Arteris. 2014
- [47] ASTM D6931-12. 2012, *Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures*
- [48] ASTM D2166/D2166M-13. 2013, *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*
- [49] Kekwick, S.V. *Best practice: bitumen-emulsion and foamed bitumen materials laboratory processing*. 2005.
- [50] CHAN, S. et al. *Comparative Performance of Conventional Cold In-place Recycling to old In-place Recycling with Expanded Asphalt – Ontario's Experience*. Transportation Research Board. 2009. Apud *Avaliação laboratorial e em pista da tecnologia de reciclagem a frio in situ com uso de*

emulsão asfáltica e com cimento para reabilitação de pavimentos. Autopista Fernão Dias – Arteris. 2014

[51] <http://www.knoow.net/cienciasexactas/quimica/electroferese.htm> 7/10/2014