

5. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ESPUMAS DE BETUME

5.1 INTRODUÇÃO

A reciclagem de pavimentos rodoviários com espumas de betume consiste na reutilização de material resultante da fresagem dos mesmos como matéria-prima para o fabrico de misturas a aplicar em novos pavimentos. Este tipo de processo surgiu nos EUA durante a crise petrolífera da década de 70 como forma de combate ao aumento do custo do petróleo e seus derivados.

Actualmente, a utilização deste processo tem uma justificação distinta. No passado o fabrico de misturas para pavimentos, tal como a generalidade das técnicas de construção, envolvia considerações técnicas e estudos de viabilidade económica. Actualmente verifica-se a necessidade de considerar além destas também os factores de intervenção e protecção ambientais, cada vez mais presentes como preocupações prioritárias das populações e com maior relevância num futuro próximo. O alargamento das soluções técnicas disponíveis, durante os últimos anos, veio também possibilitar que a conciliação destes 3 factores como prioridade actual se tornasse mais exequível e conseqüentemente houvesse uma revolução no pensamento da engenharia que passou a considerar como prioritária a adopção de técnicas de construção menos agressivas para o ambiente.

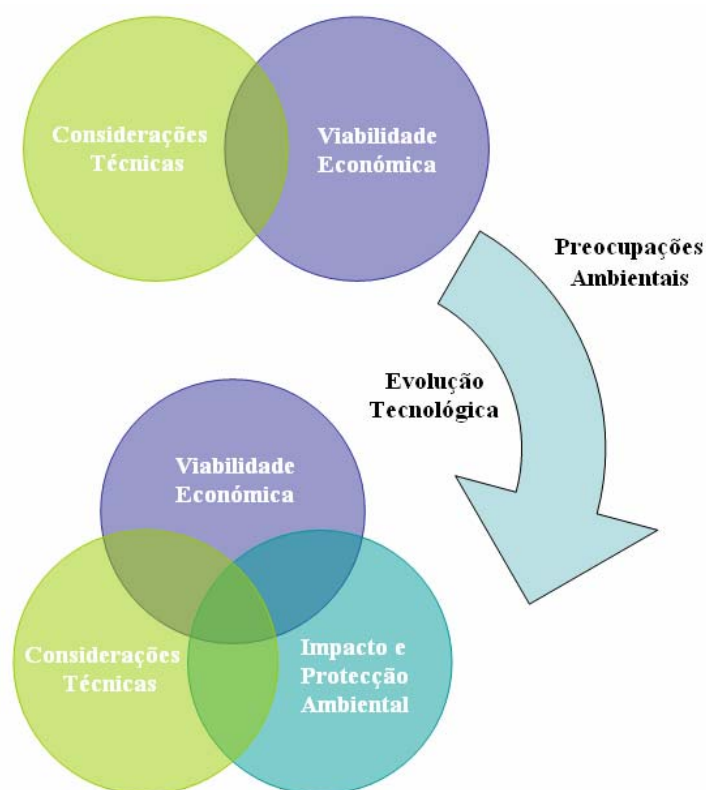


Figura 5.1 - Evolução do “Pensar” do Processo de Reabilitação de Pavimentos

O enorme investimento na construção de novas infra-estruturas rodoviárias que ocorreu em Portugal ao longo das últimas décadas e a absorção/monopolização da grande maioria dos recursos económicos destinados ao sistema viário, contribuiu para que as medidas de manutenção e reabilitação dos pavimentos já existentes fossem quase esquecidas.

Perante tal facto existem enormes áreas de pavimentos em situação de degradação profunda que requerem cuidados e medidas imediatas. A reabilitação destes pavimentos implica necessariamente a fresagem destas áreas extensas originando enormes quantidades de resíduos (material fresado) a ser depositado em vazadoiro seguida da execução de um reforço ou recarga com novos materiais.

Por outro lado, para a execução desta operação, que visa a reposição das condições de circulação inicial do pavimento, são necessárias enormes quantidades de agregados de qualidade adequada, cada vez mais caros e escassos em muitas zonas do nosso País. Esta situação é agravada pelas políticas ambientais actuais que condicionam o depósito em vazadouro e o funcionamento e abertura de locais de extracção de agregados.

Existe contudo uma alternativa à utilização de novos agregados e que neste contexto actual prolifera de uma forma cada vez mais evidente.

Se considerarmos que uma elevada percentagem dos resíduos de fresagem de pavimentos são já materiais agregados e de qualidade superior (na maioria dos casos) podemos considerar o aproveitamento destes resíduos como matéria-prima adoptando o conceito de reciclagem de pavimentos.

Note-se que o ciclo de vida do material constituinte do pavimento a reabilitar passa a ser fechado quando este é utilizado como matéria-prima para um pavimento no mesmo local ou aberto quando é aplicado em pavimentos noutras locais.

O consenso no meio técnico internacional sobre as vantagens da reciclagem vêm também justificar por si só o desenvolvimento desta técnica. Como principais vantagens pode referir-se que a utilização de pavimentos danificados como fonte de matéria prima reduz significamente a utilização de recursos naturais nomeadamente de agregados e betumes, promove a diminuição das zonas de vazadouro e depósito de resíduos provenientes do “levantamento”/fresagem de antigos pavimentos com os respectivos benefícios ambientais e por fim, reduz o custo da manutenção dos pavimentos (Campo, 1998; Pereira. e Miranda, 1999; PIARC, 2003).

Este capítulo descreve processos inerentes à reciclagem de pavimentos e identifica algumas aplicações práticas efectuadas na Austrália, no Brasil e em Portugal (Kendal, 1999; Kenda, 2001; Ramanujam, 2000; Castro, 2003; FEUP, 2001).

A conjugação das considerações teóricas com a posterior apresentação de resultados práticos de várias experiências permite inferir algumas vantagens da reciclagem de pavimentos com espumas de betume.

5.2 TIPOS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

A reciclagem de pavimentos pode ser efectuada em **central** ou “*in-situ*”.

No primeiro caso, depois de fresado o pavimento, o material é transportado para uma central onde é posteriormente utilizado como agregado para novas misturas (reciclado). O processo denomina-se a quente quando se adiciona ligante a este material posteriormente ao seu aquecimento a altas temperaturas. Quando o ligante é adicionado ao material com o aquecimento deste a temperaturas moderadas, cerca de 100 °C, o processo denomina-se semi-quente.

No segundo caso, a reciclagem “*in-situ*”, pode ser efectuada a quente ou a frio. Quando a quente o pavimento é aquecido, fresado, sendo o material resultante aquecido e combinado com betume. Quando a frio o material é fresado e misturado quase simultaneamente com o ligante escolhido (emulsão betuminosa, espuma de betume, cimento, etc.).

A reciclagem “*in-situ*” a frio é a técnica mais conhecida em Portugal, sendo que o ligante mais utilizado neste tipo de processo é a **emulsão betuminosa**. As propriedades das espumas de betume tornam este material num dos mais adequados à utilização nestes trabalhos de reciclagem de pavimentos flexíveis.

O capítulo seguinte é dedicado às características, propriedades e particularidades deste tipo de ligante. Apresenta-se ainda a sua comparação com outros ligantes, nomeadamente as emulsões, que como já foi referido são o ligante mais utilizado em Portugal em trabalhos de reciclagem a frio “*in-situ*”.

5.3 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS A FRIO “*IN-SITU*”

A reciclagem “*in-situ*” a frio com ligante betuminoso é efectuada por uma sucessão de máquinas que formam os designados “comboios de reciclagem”, com configurações semelhantes às apresentadas na figura seguinte.

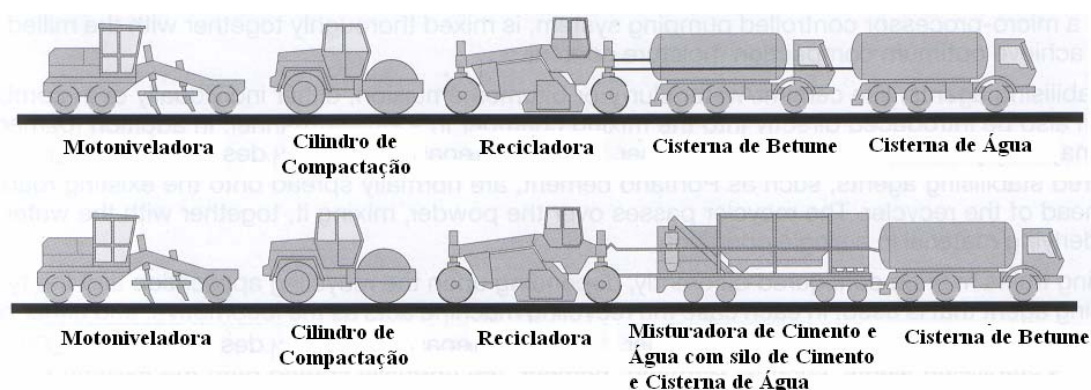


Figura 5.2 - “Comboios” de Reciclagem

A máquina recicladora inclui uma câmara recicladora na qual se incluem um tambor fresador e injectores. Nesta câmara, o tambor reciclador com um movimento rotativo, contrário à progressão, desagrega o pavimento antigo por intermédio de dentes de corte que se encontram acoplados à sua superfície. Simultaneamente com este processo, o ligante escolhido é injectado pelos injectores na câmara misturando-se com o material desagregado, procedendo-se de seguida ao seu espalhamento.

Posteriormente, o material é compactado com a passagem de um ou mais cilindros compactadores e nivelado até à cota desejada com recurso a uma motoniveladora.

É usual utilizar uma pequena percentagem (1 a 2%) de ligante hidráulico (cimento ou cal) juntamente com o ligante betuminoso (emulsão ou espuma) de forma a reduzir a sensibilidade do novo pavimento à água (especialmente na presença de materiais plásticos), corrigir a granulometria ou mesmo diminuir os tempos de cura (acelerar os tempos de rotura das emulsões).

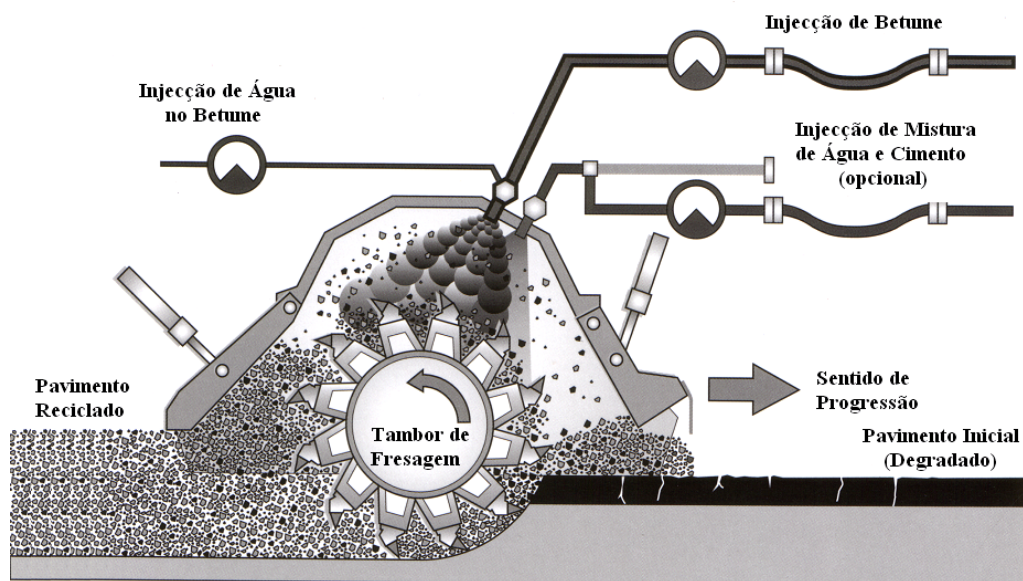


Figura 5.3 - Câmara de Reciclagem

Uma vez que os materiais provenientes da fresagem de pavimentos danificados apresentam uma elevada variabilidade nas suas propriedades, a reciclagem “*in-situ*” requer a consideração de alguns cuidados suplementares.

Esta variabilidade é consequência por exemplo da existência de reforços, desgastes ou envelhecimento diferencial dos materiais presentes no antigo pavimento a reciclar. Como não é viável proceder constantemente a correcções de formulação da mistura “*in-situ*” é uma prática aconselhável efectuar a caracterização das propriedades do material proveniente do desmonte, em termos de valores médios das suas propriedades de modo a minimizar a necessidade de proceder a correcções.

A subdivisão em zonas com características semelhantes, no caso de obras de grande extensão e a utilização de material fresado, representativo do material que será expectável encontrar no local da intervenção, na formulação da mistura, são também procedimentos úteis como medida de minimização das necessidades de correcções “*in-situ*”.

5.4 UTILIZAÇÃO DAS ESPUMAS DE BETUME NA RECICLAGEM A FRIO

No momento actual são praticamente inexistentes normas ou legislação sobre a utilização de espumas de betume na construção de pavimentos. No entanto, existem algumas recomendações que, aliadas à experiência da utilização deste tipo de ligante noutros países, servem de indicação na utilização deste tipo de ligante na reciclagem de pavimentos.

Este tipo de intervenção pode ser dividido em três grandes fases:

- Verificação das características do pavimento e se estas o elegem como adequado para reciclagem a frio (vd. 5.4.1);
- Estudo dos materiais e da composição da mistura em laboratório (vd. 5.4.2);
- Projecto do pavimento e realização da intervenção de reciclagem “*in-situ*” (vd. 5.4.3).

5.4.1 CARACTERÍSTICAS DO PAVIMENTO

Como é comum a todos os trabalhos de intervenção em pavimentos, também na utilização do processo de reciclagem com espumas existe uma primeira fase de estudo que consiste em determinar a viabilidade da utilização do processo. Para tal é necessário considerar as acções envolvidas, ambientais (temperatura, vento, etc.), cargas (provenientes do tráfego), os aspectos logísticos, as condicionantes geométricas, entre outras. No caso das espumas é recomendado (Asphalt Academy, 2002; PIARC, 2003) a consideração de alguns aspectos mais relevantes e comuns nos trabalhos de reciclagem de pavimentos a frio e que se passam a expor.

Alguns dos aspectos geométricos do pavimento podem dificultar uma intervenção de reciclagem do mesmo podendo mesmo torná-la inviável. Assim, é fundamental

verificar a existência de serviços enterrados, zonas de transição de camadas em que mudem por exemplo a sua espessura ou material, patologias e por fim cortes ou juntas. Ou seja todo o tipo de heterogeneidades pontuais ou localizadas que impliquem uma adaptação do método de trabalho.

É também importante considerar se o equipamento a utilizar, recicladora, se adapta de forma adequada à directriz da estrada, sobretudo no que diz respeito às curvas de menor raio de curvatura.

Quanto aos materiais e patologias do pavimento deve ser considerada a existência de camadas de material com espessuras uniformes pois facilitam o controlo da produção da mistura.

Problemas estruturais profundos podem impossibilitar a utilização da reciclagem uma vez que este processo está limitado a uma profundidade máxima devido a limitações dos equipamentos utilizados.

A existência de fendas ou remendos em grandes extensões ou mesmo uma constante variação da humidade das camadas do pavimento dificulta a produção da mistura uma vez que implica a necessidade de proceder a constantes correcções na dosagem da mistura.

Todos estes factores devem ser ponderados para determinar se a utilização do processo de reciclagem a frio com espumas é viável ou não.

5.4.2 ESTUDO DAS MISTURAS DE ESPUMAS EM LABORATÓRIO

Nesta fase, o objectivo é determinar a formulação da mistura que maximiza as suas propriedades. Para tal são realizados estudos em laboratório que são similares aos realizados para outros tipos de misturas. No entanto e dadas algumas particularidades das espumas existem aspectos que devem ser realçados.

Apresenta-se de seguida um procedimento que pode servir de base para o estudo em laboratório de misturas com espumas de betume, tendo presente o esquema da figura 3.1

Numa primeira etapa deve-se proceder à caracterização dos agregados existentes no pavimento a reciclar, nomeadamente no que diz respeito à sua granulometria e constituição mineralógica (Castro, 2003). No caso da constituição mineralógica não existem grandes condicionantes a ter em conta visto a compatibilidade das espumas com os agregados ser de um modo geral boa, devendo apenas ser considerada a existência ou não de materiais plásticos (vd. Tabela 3.1). Para este efeito é recomendada a determinação dos limites de Atterberg.

No caso da granulometria deve-se ter em conta algumas especificidades das espumas de betume. Para se proceder ao estudo granulométrico é necessário a utilização de amostra previamente extraída do pavimento, para tratar em laboratório. Esta extracção deve ser efectuada preferencialmente pela máquina a utilizar na intervenção geral de reciclagem do pavimento existente de modo a que a amostra recolhida seja a mais representativa possível das condições de operação aquando da intervenção.

Como foi já referido, nas misturas obtidas com espumas o betume aglomera os finos formando um mástique/argamassa que aglomera depois os agregados maiores, diferindo do que acontece, por exemplo com as misturas de emulsões em que a escassez de finos, devido á preocupação de que o índice de vazios tenha um valor suficiente que permita a eficiente evaporação da água da emulsão, o betume envolve de uma forma mais evidente os agregados grossos.

É então evidente que a presença de finos é extremamente importante para a obtenção de uma boa mistura. Assim aconselha-se a utilização dos fusos granulométricas representados na figura 3.2 (Asphalt Academy, 2002) como intervalos de referência para os agregados a utilizar na mistura. Normalmente os agregados obtidos por fresagem de pavimentos, caso da reciclagem, contêm poucos finos, sendo necessário adicionar agregados finos para obter curvas no interior dos intervalos de referência ou mesmo melhorar a resistência à humidade ou rigidez.

É também usual proceder á determinação do teor em betume do material fresado, e também da sua curva e humidade óptima de compactação. Um dos ensaios mais utilizados nesta operação é o ensaio do Proctor Modificado.

Numa terceira etapa, é necessário escolher o betume a utilizar e estipular os parâmetros envolvidos na produção da espuma de betume que maximizam as suas propriedades. Recomenda-se a utilização de betumes com penetração entre 80 e 200. Para determinar a percentagem óptima de água, de modo a obter uma espuma de qualidade superior, recomenda-se a utilização do FI. Fazendo variar a percentagem de água adicionada ao betume no intervalo compreendido entre 1 e 4 % e calculando para cada valor o FI podemos traçar um gráfico semelhante ao apresentado na figura 4.8. Deste modo determinamos o valor óptimo da percentagem de água a utilizar, ou seja o que maximiza o valor do FI.

Na figura 5.4 apresentamos um quadro onde constam os valores limites mínimos do FI que devem ser tidos em conta, e a respectiva viabilidade em função da temperatura do agregado.

Foam Index (segundos)	Agregados a 15° C	Agregados 25° C	
< 75	Red	Red	■ Muito Bom
75 a 100	Yellow	Yellow	■ Bom
100 a 125	Yellow	Yellow	■ Aceitável
125 a 175	Yellow	Green	■ Pouco Aceitável
175 a 200	Green	Green	■ Não Aceitável
> 200	Green	Green	

Figura 5.4 - Intervalos de Referência para os Valores do FI

Para esta operação é necessária a utilização de equipamento específico, central de produção de espuma, sendo o laboratório móvel da Wirtgen um dos mais divulgados e de uso mais generalizado.

Como foi referido, é importante considerar também nesta fase a temperatura e humidade dos agregados no momento em que se procede à sua mistura com o ligante. A estimativa destes valores deve ser o mais próxima possível da temperatura e da humidade dos agregados do pavimento a reciclar aquando da intervenção e devem ser estes os valores utilizados na preparação dos provetes a ensaiar em laboratório.

Na quarta etapa procede-se à mistura dos agregados com a espuma do betume. Nesta fase é necessário ter em conta o tipo de misturador a utilizar. É referido que misturadores de tipos diferentes podem criar diferenças de valores da ordem dos 25 % em algumas das propriedades da mistura (Asphalt Academy, 2002). É imperioso que o misturador a utilizar nesta fase seja o mais representativo possível das condições a verificar “*in-situ*”, ou seja na câmara de mistura da recicladora a utilizar. Outro factor a ter em conta é o teor de humidade dos agregados na altura da mistura.

As indicações (Asphalt Academy, 2002) referem valores compreendidos no intervalo de 65 a 85 % da humidade determinada pelo método de compactação modificado da AASHTO como a humidade óptima de mistura do agregado com o ligante. É referido também que este valor varia com a percentagem de finos, devendo este valor ser considerado para a determinação do valor da humidade óptima de mistura.

Na quinta etapa procede-se à compactação da mistura. Neste caso as recomendações (Asphalt Academy, 2002) referem que a compactação deve ser efectuada em moldes de 152mm de acordo com a compactação modificada da AASHTO. A compactação giratória pode ser também utilizada. Mas neste caso o valor da humidade óptima de compactação tende a ser um pouco diferente do valor para a compactação AASHTO e deve ser aferido. Já no caso do procedimento adoptado no Brasil a compactação é efectuada de modo a obter corpos de prova para ensaio de Marshall, sendo a sua compactação efectuada com 75 golpes por face (Castro, 2003). Em qualquer dos

casos, o nível de compactação atingido em laboratório deve ser o mais próximo possível do valor previsto “*in-situ*”.

A sexta etapa consiste no processo de cura das amostras. O procedimento sugerido consiste em deixar as amostras no molde 24 horas submetendo-as posteriormente a 40 °C durante 72 horas, depois de colocados no interior de sacos plástico selados. Passadas as 72 horas os sacos que envolvem os provetes são substituídos e os provetes permanecem em repouso até atingirem a temperatura de 25° C. Este procedimento de cura simula as condições de humidade atingidas “*in-situ*” pela mistura decorridos seis meses após a construção (Asphalt Academy, 2002). No caso Brasileiro o procedimento de cura consiste em deixar os provetes em repouso à temperatura ambiente durante as primeiras 24 horas, sendo estes posteriormente colocados durante 72 horas em estufa a 60ª C.

Finalmente procede-se à realização dos ensaios necessários para a determinação das propriedades e características da mistura envolvidas no dimensionamento da camada. Para a quantificação das propriedades referidas são muito diversos os procedimentos adoptados por cada País. É também de referir que dada a complexidade e variabilidade dos fenómenos que influenciam quer a cura quer a evolução das propriedades “*in-situ*” a simulação dessas características em laboratório envolve dificuldades acrescidas, motivo pelo qual os métodos utilizados actualmente permanecem no campo dos métodos empíricos.

No caso do Brasil o ensaio escolhido é o ensaio de compressão diametral, sendo determinada a resistência à tracção sobre provetes secos e sobre provetes saturados. O teor óptimo de betume adoptado é aquele que maximiza a resistência à tracção por compressão diametral saturada. É também usual proceder á determinação do módulo de resiliência.

No caso australiano o procedimento é semelhante sendo que para a determinação do teor óptimo de betume é também tido em conta o valor do módulo de resiliência.

Por exemplo no caso da África do Sul são utilizados os ensaios de tracção por compressão diametral conjugados com ensaios de compressão não confinados,

embora seja referido que os ensaios triaxiais são mais adequados para determinação das propriedades das misturas.

A título de exemplo referem-se alguns valores de referência, para cada um dos tipos de ensaio mais vulgarmente utilizados na determinação das propriedades de misturas de espuma de betume (Wirtgen, 2001a). Para o valor da resistência à tracção obtido por meio do ensaio de compressão diametral, efectuado em provetes Marshall à temperatura de 25° C, temos valores entre 350 e 800 kPa, para misturas contendo 50% de agregado reciclado e 50% de agregado “virgem”. Para o módulo de resiliência o valor de referências varia entre 2500 e 5000 MPa.

5.4.3 PROJECTO E INTERVENÇÃO

Foi já referido no capítulo 2, e representado na figura 2.3, que a relação entre os constituintes de uma mistura de espumas de betume influencia as suas propriedades, tais como a flexibilidade e a rigidez. O comportamento destas misturas está então muito relacionado com a sua composição percentual, podendo ser dividido em três grandes grupos.

Misturas em que os valores percentuais de betume na mistura são inferiores a 2 % exibem um comportamento mais característico de materiais granulares ou seja dependente do seu estado de tensão (Asphalt Academy, 2000).

Jenkins (2000) verificou que o módulo resiliente ou reversível pode duplicar para casos em que a soma das 3 tensões principais a que o material se encontra submetido, passa de 100 para 900 kPa, acentuando esta dependência. No caso destas misturas a rotura ou colapso dá-se por deformação devido à repetição das cargas aplicadas. Como esta deformação está relacionada com os estados de tensão, os ensaios triaxiais são os mais adequados para o estudo deste tipo de misturas. Nestas misturas e dado o seu comportamento é recomendada a utilização de agregados de boa qualidade ou no mínimo de qualidade aceitável pois é de antecipar que para agregados de qualidade inferior a mistura não apresentará características mínimas de resistência.

No caso de às misturas do tipo da anterior ser adicionado fíler activo (cimento) em percentagens superiores a 1 %, a mistura tende a ter um comportamento mais próximo das misturas tratadas com cimento. Neste caso, a qualidade dos agregados utilizados na mistura deixa de ter uma influência tão significativa nas propriedades da espuma sendo que mesmo agregados de qualidade inferior serão adequados para utilização neste tipo de misturas em estradas de tráfego moderado. Este tipo de misturas apresenta uma rigidez elevada, sendo que o seu processo de rotura se dá preferencialmente devido a fissuração por quebra das ligações do cimento. O aparecimento deste tipo de fissuração está relacionado com as tensões de tracção que surgem devido às deformações impostas pela circulação do tráfego. Assim, para este caso de misturas recomenda-se a utilização de ensaios, por exemplo o ensaio de tracção por com pressão diametral, que permitam a determinação da deformação e tensão de tracção na rotura de modo a considerar este valor no dimensionamento.

No terceiro grupo incluem-se as misturas de espuma que contêm uma percentagem de betume superior a 2 % e pequenas percentagens de fíler activo (cimento). Este último grupo tem um comportamento visco-elástico semelhante ao apresentado pelas misturas betuminosas a quente. No entanto, este tipo de mistura tende a ter um comportamento superior, relativamente às anteriores, uma vez que apresenta propriedades de flexibilidade aliadas a propriedades de rigidez.

A selecção do tipo de mistura a utilizar no pavimento depende de vários factores como já foi referido (factores económicos, acções e outros).

5.5 BREVE EXPOSIÇÃO DE ALGUMAS INTERVENÇÕES EFECTUADAS

Foi referido que a utilização das espumas de betume no processo de reciclagem ou reabilitação de pavimentos se revela uma opção competitiva face a outros métodos utilizados. Embora este processo se encontre ainda num estado embrionário, pois não existem ainda muitas intervenções utilizando este tipo de processo, podem referir-se alguns estudos que avaliam o desempenho de algumas das intervenções já

efectuadas. A maioria destes estudos diz respeito a intervenções realizadas em outros países, uma vez que em Portugal este processo foi utilizado apenas numa intervenção.

Neste ponto analisam-se alguns destes estudos realizados pelo “Queensland Main Road Department” da Austrália, designado a partir deste ponto por QMRD, algumas intervenções efectuadas no Brasil e a intervenção já realizada no nosso País (Kendal, 1999; Kenda, 2001; Ramanujam, 2000; Castro, 2003; FEUP, 2001).

5.5.1 A EXPERIÊNCIA DO QMRD-AUSTRÁLIA

O QMRD tem na última década testado possíveis soluções de reciclagem e reabilitação de pavimentos de forma a maximizar este tipo de trabalho quer do ponto de vista económico quer do ponto de vista da eficiência. Esta necessidade surge como consequência dos pavimentos da sua extensa rede viária virem nos últimos anos a atingir a idade limite de projecto. Deste modo passou a investir-se cada vez menos em construção e mais em manutenção e reabilitação. Esta “viragem” no pensamento das administrações viárias será, como foi já referido num capítulo anterior, uma mudança a verificar no nosso País no médio longo prazo. Uma das vantagens dos estudos realizados por este departamento foi a utilização de vários processos em simultâneo no mesmo pavimento, o que permite comparar o seu desempenho de uma forma válida.

5.5.1.1 A EXPERIÊNCIA DE GLADFIELD

A primeira experiência realizada pelo QMRD foi em Gladfield. Esta primeira intervenção, realizada em 1997, tinha uma extensão de 1,6 km. O pavimento existente era constituído por uma camada de base de 125 mm de espessura sobre uma sub base com 200 mm de espessura. A capacidade resistente destas duas camadas medida apresentava valores de CBR de 30 % e 2 %, respectivamente. A camada de desgaste era constituída por uma sobreposição de camadas de selagem betuminosas perfazendo uma espessura de 30 mm.

A profundidade de reciclagem variou entre 200 mm na faixa esquerda e 250 mm na faixa direita. Foi utilizada espuma de betume e cimento nas percentagens de 3,5 e 2%, respectivamente.

O pavimento reciclado era aberto ao tráfego no final de cada dia que durou a intervenção. As deformações foram medidas no fim do primeiro dia (com o Deflectómetro de Impacto) e apresentavam valores de 0,75 mm atestando o rápido aumento da capacidade resistente característico das espumas de betume. O pavimento permaneceu deste modo durante duas semanas, após o que foi selado por uma camada de desgaste. Durante este tempo não se verificou o aparecimento de deformações significativas.

O custo da intervenção quando comparado com métodos alternativos revelou um acréscimo de custo da ordem dos 10 %, mas dada a menor manutenção que se prevê necessária nos pavimentos de espumas este valor pode revelar-se ainda assim bastante competitivo.

O pavimento realizado estava sujeito a um tráfego pesado muito intenso. Contudo após dois anos de serviço apresenta patologias em apenas 10 % da sua extensão. Estas patologias são maioritariamente fendas surgidas como consequência quer da elevada percentagem de cimento utilizada, que fazem com que o comportamento do pavimento seja mais rígido quer da fraca capacidade resistente das camadas de base quer da circulação de veículos com excesso de carga.

5.5.1.2 A EXPERIÊNCIA DE RAINBOW BEACH

A segunda experiência foi realizada pelo QMRD no distrito de Gympie em Junho de 1998. Esta experiência tem particular interesse uma vez que foram utilizados como ligante espumas e emulsões de betume, permitindo comparar os seus desempenhos.

Numa das faixas foram aplicadas as misturas com emulsão com as composições de 1 % de cimento e 1 % de betume residual numa extensão de 100 m, 2 % de cimento e 2 % de betume residual numa extensão de 200 m e 2 % de cimento e 3 % de betume numa extensão de 300 m.

As misturas com espumas foram aplicadas na outra faixa de rodagem com as composições de 2 % de cal e 3 % de betume numa extensão de 200 m, 2 % de cal e 4 % de betume numa extensão de 200 m e 2 % de cimento e 5 % de betume numa extensão de 200 m.

Em ambas as faixas de rodagem foi construída uma secção de controlo com 100 m de extensão e utilizando como ligante 1 % de cimento. No período compreendido entre a construção das secções e a execução da camada de desgaste, 3 semanas, o pavimento esteve sujeito a condições climatéricas agressivas: baixas temperaturas e chuva intensa.

Durante este período, as espumas tiveram um comportamento superior ao apresentado pelas emulsões. No caso das últimas verificou-se a formação de rodeiras e a tendência para que a sua camada superficial se tornasse escorregadia. No caso das espumas não se observou a formação de patologias ou a necessidade de realizar qualquer acção de correcção antes da “selagem”.

Comparando o desempenho dos dois ligantes torna-se evidente que **as espumas apresentam um melhor desempenho, quer devido ao seu aumento de resistência inicial, quer devido à sua resistência às condições climatéricas** (pluviosidade). É também referido que nesta experiência não se verificou o aparecimento de fendas, como na experiência descrita no ponto anterior. Este facto deve-se fundamentalmente à utilização da cal em substituição do cimento.

5.5.1.3 A EXPERIÊNCIA DE INGLEWOOD

A terceira intervenção efectuada pelo QMRD com espumas de betume teve lugar em Gladfield, num outro ponto da mesma estrada da primeira experiência. Nesta acção a composição da mistura utilizada continha 4% de betume e 2% de cal hidratada.

Após o primeiro dia de construção a camada executada foi sujeita a uma chuva de grande intensidade, cerca de 30 mm. A camada permaneceu sem “selagem” nas seis semanas seguintes à construção, durante as quais esteve sujeita a chuvas muito intensas. Contrariamente ao que seria expectável, o pavimento não apresentou

patologias graves, sendo que após pequenas intervenções de correcção se procedeu à sua selagem com a execução da camada de desgaste.

Mais uma vez se evidencia a **desempenho superior das espumas de betume sob condições climatéricas adversas**. Este pavimento apresenta uma superfície horizontal promovendo deste modo a formação de camadas de água à sua superfície, complementado com hábitos de rega por “inundação” nos terrenos agrícolas adjacentes. Embora num cenário adverso, o comportamento do pavimento tem sido normal desde que se procedeu à sua “selagem”, não sendo necessário recorrer a correcções do mesmo.

5.5.1.4 A INTERVENÇÃO DE NEW ENGLAND

Na quarta intervenção documentada pelo QMRD foi utilizada uma mistura com 3,5% de betume e 2% de cal. A extensão total desta intervenção foi de 17 km, aproximadamente. A percentagem de betume utilizado foi determinada de modo a que o módulo elástico (resiliente) para a mistura saturada quantificasse um valor mínimo de 1500 MPa.

Quando comparado o custo desta intervenção com o processo de reciclagem com emulsão verifica-se que os valores de construção por m² são aproximadamente iguais. No entanto, antecipa-se um melhor desempenho das misturas de espuma face às misturas de emulsão, uma vez que as primeiras requerem menos manutenção.

Para a monitorização do desempenho do pavimento ao longo do tempo foram medidas as flechas (com o Deflectómetro de Impacto) e retirados provetes do pavimento reciclado que permitiram reter algumas observações importantes. As flechas medidas após construção quantificaram valores compreendidos entre 0,15 e 0,45 mm. As mesmas flechas medidas um ano após a construção quantificavam valores entre 0,10 e 0,25 mm, ou seja diminuíram substancialmente. Verificou-se também que a relação entre as deformações aumentou. Estes factos conjugados permitem afirmar que a rigidez do pavimento aumentou. Como não se verificou o aparecimento de fendas pode-se também afirmar que **este aumento de rigidez do**

pavimento não comprometeu a sua flexibilidade. Quanto ao módulo elástico verificou-se, que para o módulo com a mistura saturada, os valores obtidos eram bastante superiores aos 1500 MPa admitidos na fase de concepção.

5.5.2 A EXPERIÊNCIA EM PORTUGAL

Em Portugal foi realizada uma intervenção de reciclagem com espumas de betume como ligante em Junho de 2002. Esta experiência teve lugar nas Ruas D. João Coutinho e Ferreira de Castro no Porto. A extensão total da intervenção foi de 1200 m totalizando uma área total de cerca de 15000 m². O pavimento alvo de reciclagem encontrava-se num estado de degradação muito avançado e com todo o tipo de patologias inerentes a um pavimento em rotura avançada. Este pavimento era constituído por uma camada de desgaste e uma base de material britado de granulometria extensa com sensivelmente 20 cm de espessura.

A formulação da mistura utilizada continha 3% de betume, 2% de cimento e 9 % de pó de pedra. O valor estimado para o módulo elástico quantificava 2000 MPa. A adição de pó de pedra à mistura tinha como objectivo corrigir a granulometria da mistura, uma vez que o material obtido na fresagem do pavimento continha poucos finos.

Note-se que a base do pavimento inicial era constituída por material britado de granulometria extensa. A adição de uma percentagem mais elevada de cimento foi evitada por um lado para precaver a formação de uma camada muito rígida que pudesse originar o aparecimento de fendilhações e por outro lado, devido a factores económicos.

O processo de trabalho para a execução da intervenção consistiu nos passos que se passam a apresentar. Numa primeira fase procedeu-se à demolição da parte superior das caixas das infra-estruturas existentes no arruamento. Este trabalho foi necessário de modo a evitar eventuais paragens na progressão da recicladora ou mesmo a danificação da mesma. Depois de terminado este trabalho seguiu-se a intervenção propriamente dita, que foi efectuada por faixas.

O trânsito da faixa a intervir era desviado para a outra faixa enquanto os trabalhos decorriam.

Na faixa a reciclar, espalhava-se o cimento e o pó de pedra a uma taxa tal que quantificasse o valor percentual da mistura final. De seguida, passava a máquina recicladora que procedia simultaneamente à escarificação, produção da espuma e mistura com o agregado reciclado.

Logo atrás seguia o cilindro compactador que procedia à compactação da camada. Logo após a compactação, a camada era aberta ao tráfego sendo que não se verificou a formação de patologias na camada, evidenciando a sua capacidade resistente.

Depois de reciclada toda a área da intervenção o pavimento permaneceu aberto ao tráfego tendo sido selado por uma camada de desgaste uma semana depois. Mais uma vez se verificou que o pavimento teve uma performance muito boa uma vez que não se formaram quaisquer patologias, ainda que o tráfego fosse predominantemente pesado pois este arruamento é um dos acessos à zona industrial do Porto.

De forma a avaliar a capacidade e comportamento do pavimento reciclado foram extraídas carotes com o objectivo de se determinar a espessura das camadas obtidas na construção. Após análise verificou-se que as espessuras obtidas coincidiam com as estipuladas aquando do projecto. Foram também realizados ensaios de carga (com o Deflectómetro de Impacto) de modo a determinar os valores do módulo elástico das camadas. Os valores obtidos para a camada de espuma de betume apresentavam os valores de 800 MPa logo após a reciclagem e ainda sem a camada de desgaste e os valores de 1900 MPa, 10 meses após a conclusão dos trabalhos. Estes valores permitem mais uma vez salientar que as espumas de betume apresentam um módulo elástico inicial bastante elevado e que este tem uma evolução considerável ao longo do tempo, sendo que um ano após a construção, tende a situar-se em valores que são o dobro dos iniciais.

5.5.3 ALGUMAS EXPERIÊNCIAS REALIZADAS NO BRASIL

Em (Castro, 2003) são apresentados os resultados de alguns ensaios realizados sobre amostras produzidas durante operações de reciclagem efectuadas no Brasil, entre 2000 e 2002, utilizando espumas de betume. As amostras ensaiadas descrevem quatro obras, listadas de seguida:

- Rodovia PR-151 (Entre Ponta Grossa e Jaguariaíva);
- Rodovia SP-330 (Anhanguera, km 165 a 234);
- Rodovia BR-277 (Entre São Luís do Purunã a Campo Largo no Estado do Paraná);
- Rodovia BR-354 (Formiga/MG).

5.5.3.1 A RODOVIA PR-151

O pavimento a reciclar era constituído por uma base de espessura variável construída com brita graduada. A camada de desgaste era constituída por uma mistura betuminosa a quente com 5 cm de espessura. A reciclagem foi realizada até à profundidade de 15 cm. Para a realização desta camada foi utilizada numa primeira fase um betume com penetração 85/100, sendo o seu teor na mistura de 2 %. Foi também utilizado cimento na percentagem de 1 % e pó de pedra na proporção de 20 %, de modo a corrigir a granulometria do agregado fresado. Após a reciclagem o pavimento foi “selado” com uma camada de 5cm de uma mistura betuminosa a quente. Num primeiro conjunto de ensaios efectuados foram ensaiados quatro provetes, produzidos no local da obra, dois dos quais produzidos com incorporação de espuma de betume e os restantes dois sem incorporação do ligante. Estes provetes foram submetidos a um ensaio para determinação do módulo resiliente e posteriormente ao ensaio de tracção por compressão diametral, sendo para cada caso,

com e sem espuma de betume, ensaiado um provete seco e outro saturado. Os valores determinados para o módulo resiliente quantificaram valores médios aproximados de 2400 MPa para os provetes contendo espuma e 500 MPa para os provetes sem espuma de betume. Quanto à resistência à tracção para os provetes com espuma os valores encontrados foram de 0,55 e 0,35 MPa para o provete seco e saturado, respectivamente. Para os provetes sem espuma os valores medidos foram de 0,14 e 0,09 MPa. Podemos observar que os provetes contendo espuma atingiram valores resistência à tracção bastante superiores aos valores atingidos pelos provetes sem espuma. Quanto ao módulo de resiliência o valor é muito superior.

Numa segunda fase a formulação da mistura passou a incluir um betume com penetração 100/120 na proporção de 1,5 %. Nesta fase foram ensaiados 20 provetes, tendo sido submetidos ao mesmo tipo de ensaios da primeira fase. Os valores obtidos em termos médios foram de 4,26 MPa para a resistência à tracção seca e 2,6 MPa para a resistência saturada. O valor médio encontrado para o módulo resiliente foi de 1977 MPa.

5.5.3.2 A RODOVIA SP-330

Nesta obra o pavimento a reciclar era constituído por uma base com espessura de 20 cm construída com brita graduada. A camada de desgaste era constituída por uma mistura betuminosa a quente com 10 cm de espessura. A reciclagem foi realizada até à profundidade de 17 cm. Para a realização desta camada foi utilizado um betume com penetração 20, sendo o seu teor na mistura variável entre 2,5 e 4,0 %. Foi também utilizado cimento numa percentagem variável entre 1 e 1,5 % em alguns dos provetes, enquanto que nos restantes foi utilizada como solução alternativa cal numa percentagem de 3 %. Após a reciclagem o pavimento foi “selado” com uma camada de 6 cm de uma mistura betuminosa a quente e 10 mm de um micro-revestimento a frio. Nove provetes foram ensaiados, recorrendo aos ensaios já referidos no ponto anterior. Os valores determinados para o módulo resiliente quantificaram valores compreendidos entre 2628 e 4688 MPa. Quanto à resistência à tracção por

compressão diametral no estado seco, o valor médio encontrado quantificava aproximadamente 0,50 MPa. Não se verificaram diferenças significativas nos resultados dos ensaios realizados como os provetes contendo cimentos ou cal.

5.5.3.3 A RODOVIA BR-277

Nesta obra o pavimento a reciclar era constituído por uma base com espessura de 20 cm construída com brita graduada. A camada de desgaste era constituída por uma mistura betuminosa a quente com 10 cm de espessura. A reciclagem foi realizada até à profundidade de 15 cm. Para a realização desta camada foi utilizado um betume com penetração 100/120, sendo o seu teor na mistura de 1,5%. Foi também utilizado cimento na percentagem de 1%. Após a reciclagem o pavimento foi “selado” com uma camada de 6 cm de uma mistura betuminosa a quente. Foram ensaiados cinco provetes para determinação do módulo de resiliência, produzidos no local da obra, e que foram posteriormente utilizados no ensaio de tracção por compressão diametral, três dos quais foram ensaiados na condição seca e os restantes dois saturados. Os valores determinados para o módulo resiliente quantificaram valores compreendidos entre 1900 e 2850 MPa. Quanto à resistência à tracção os valores encontrados foram de aproximadamente 0,65 MPa para os provetes secos e de 0,33 MPa para os provetes saturados. Foram também ensaiados três provetes retirados do pavimento quinze dias após a intervenção de reciclagem do pavimento. Para estes provetes foi determinado o valor da resistência à tracção por compressão diametral, em provetes secos, sendo que os valores obtidos variaram entre 0,57 e 0,90 MPa.

5.5.3.4 A RODOVIA BR-354

Nesta obra o pavimento a reciclar era constituído por uma base com espessura de 20 cm constituído por um saibro silto arenoso. A camada de desgaste era constituída por uma mistura betuminosa a quente com 11 cm de espessura, aplicada em duas

camadas. A reciclagem foi realizada até á profundidade de 20 cm. Para a realização desta camada foi utilizado um betume com penetração 20, sendo o seu teor na mistura variável entre 3,0 e 3,5 %. Foi também utilizado cimento numa percentagem variável entre 1,5 e 2,5 %. Após a reciclagem o pavimento foi “selado” com uma camada de 5 a 10 cm de uma mistura betuminosa a quente. Foram ensaiados 22 provetes, 6 dos quais produzidos no local da obra, grupo 1, outros 6 retirados do pavimento passados 3 meses, grupo 2, quatro dos restantes foram moldados em laboratório, grupo 3, e os restantes seis foram retirados do pavimento em pares aos 9, 10 e 11 meses, grupos 4 5 e 6. Os ensaios utilizados foram os já referidos nos pontos anteriores Os valores determinados para o módulo resiliente quantificaram valores médios aproximados de 3000 MPa para os provetes do grupo 1, 4850 para o grupo 2, 2300 para o grupo 3 e 2870, 3050 e 2900 para os grupos 4 5 e 6 respectivamente. Quanto á resistência à tracção para provetes secos os valores médios medidos foram de 0,54; 0,59; 0,38; 0,40; 0,37 e 0,53 para os grupos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 respectivamente. Analisando estes valores observa-se por exemplo que para o grupo 3 estes são inferiores aos valores expectáveis quando comparados com os dos grupos 1 e 2. Este facto é justificado pela deficiente moldagem dos provetes deste grupo e que foi realizada em laboratório. Quanto aos valores dos grupos 4, 5 e 6 verificam-se que são inferiores aos do grupo 1, contrariamente ao que seria de esperar, uma vez que estes provetes tendo já mais idade, deveriam apresentar valores superiores fruto da evolução das propriedades, facto explicado em capítulos anteriores. Esta evidência justifica-se pelo facto de serem precisamente os provetes destes grupos que foram moldados com a menor quantidade de espuma de betume, 1,5 e 2 %.