

## **CAPÍTULO 2**

### **RECICLAGEM DE PAVIMENTOS**

#### **2.1 INTRODUÇÃO**

A reciclagem, desde o seu aparecimento, tem-se mostrado ao longo dos anos como uma boa alternativa de reabilitação de pavimentos. Têm-se desenvolvido diferentes métodos de reciclagem especificamente para a situação do pavimento existente.

Segundo Lima (2003) é importante diferenciar reciclagem e fresagem. A reciclagem de um pavimento é uma técnica de restauração, enquanto que a fresagem do pavimento é uma operação onde o pavimento, ou parte dele, é cortado através de um equipamento dotado de um cortador giratório empregando movimento rotativo.

Entende-se por reciclagem como sendo um processo de reutilização de resíduos. De acordo com PIARC (2002), citado por Gomes (2005), o termo reciclagem deve apenas ser aplicado quando se trata de processos onde os materiais readquirem as mesmas propriedades que têm os materiais dos quais partem.

O conceito escada, segundo PIARC (2002), citado por Gomes (2005), tem sido um conceito bastante importante no que diz respeito à orientação de estratégias para a conservação das estradas. Este conceito, apresentado na Figura 2.1, refere que os esforços devem estar concentrados na utilização dos materiais mais duráveis nos pavimentos procurando construir estradas com longas vidas de projecto. Quando for necessário reconstruir, os materiais recuperados devem ser reutilizados nas mesmas camadas e com propriedades idênticas àquelas da estrutura do pavimento original. Caso não seja possível os materiais devem ser reutilizados em camadas de qualidade inferior. Excepcionalmente, quando todas as possíveis aplicações tenham sido exploradas, uma

quantidade limitada de materiais recuperados dos pavimentos poderá ser transportada para depósitos a vazadouro. Esta, é a opção menos aceitável do ponto de vista ambiental e deve ser evitada sempre que possível, visto que, segundo a LER – Lista Europeia de Resíduos, o material betuminoso proveniente de camadas betuminosas (alcatrão) é considerado um resíduo perigoso.

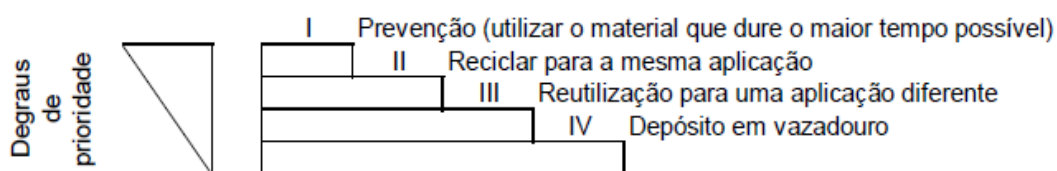


Figura 2. 1: Conceito de escada.

Fonte: PIARC (2001), citado por Gomes (2005, p. 30).

A maior parte dos materiais rodoviários é oriundo de pedreiras impondo-se a utilização dos agregados já utilizados nas estradas aquando da sua reabilitação.

Normalmente a reabilitação de pavimentos é frequentemente conseguida por reconstrução ou reforço tradicional. A reciclagem aparece como alternativa reaproveitando os materiais provenientes dos pavimentos degradados apresentando as seguintes vantagens ambientais, técnicas e económicas:

- Vantagens ambientais:
  - Redução do impacte ambiental; misturas retiradas dos pavimentos não vão para vazadouros; redução do problema da produção de resíduos;
  - Os recursos naturais são limitados;
  - Economia de materiais (ligante e agregados) e de energia (técnica a frio). (Valorização Económica e Energética);
  - Redução do impacto das obras de conservação: para o pavimento existente; para os utentes;
  - Redução das operações de transporte de agregados.
- Vantagens técnicas:
  - Controle da cota final do pavimento existente;

- Correção do perfil longitudinal e transversal;
- Eliminação do fendilhamento ou redução do problema.
- Vantagens económicas:
  - Custos globalmente inferiores.

No entanto, a reciclagem também tem as suas limitações, tanto ambientais, como técnicas. Essas limitações são as seguintes:

- Limitações ambientais:
  - Poluição da reciclagem “in situ” (sobretudo a quente).
- Limitações técnicas:
  - Qualidade do material a reciclar (ligante e agregado);
  - Espessura limitada para a camada reciclada a frio;
  - Características mecânicas finais das camadas recicladas;
  - Mudar de atitude na produção e controle de qualidade.

Nos últimos anos, devido a uma maior consciencialização acerca dos problemas que podem derivar da não reciclagem dos pavimentos, têm-se estudado novas técnicas de reciclagem e aperfeiçoado as já existentes. Tem-se, também, assistido a um progressivo desenvolvimento tecnológico, no que diz respeito aos equipamentos utilizados na reciclagem de pavimentos, existindo, nos dias de hoje, equipamentos capazes de reciclar materiais em central, ou *in situ* a uma profundidade já considerada relevante e numa só passagem (Azevedo *et al.*, 2003 citado por Gomes, 2005).

Quanto às técnicas de reciclagem, estas distinguem-se principalmente pelo tipo de ligante utilizado (betume, emulsão betuminosa, espuma de betume, cimento ou cal), pela temperatura do processo de fabrico da mistura reciclada (a frio ou a quente) e pelo local de fabrico da mistura (*in situ* ou em central). O Quadro 2.1 resume as técnicas de reciclagem existentes.

Quadro 2. 1: Principais técnicas de reciclagem.  
Fonte: Baptista (2006, p. 10)

<u>Tipo de reciclagem</u>	<u>Local de mistura</u>	
	<i>In situ</i>	Em central
- Reciclagem a frio com cimento	Sim	Não
- Reciclagem a frio com emulsão betuminosa	Sim	Sim
- Reciclagem a frio com betume-espuma	Sim	Sim
- Reciclagem semi-quente com emulsão betuminosa	Não	Sim
- Reciclagem a quente	Sim	Sim

Nas técnicas de reciclagem em central, o material a reciclar, normalmente proveniente da fresagem, é transportado para a central sendo depois incorporado na produção das misturas recicladas, as quais são aplicadas no local de proveniência do material fresado ou noutras obras. Nas técnicas de reciclagem *in situ*, depois da fresagem dos materiais (misturas betuminosas e/ou materiais das camadas granulares) é adicionado o respectivo ligante, seguindo-se a aplicação sequencial da mistura reciclada. Nestas técnicas, regra geral, todo o material fresado é incorporado na nova mistura (Baptista, 2006).

Neste capítulo irá fazer-se apenas uma breve exposição das técnicas de reciclagem apresentadas na Figura 2.2, em central com emulsão betuminosa.

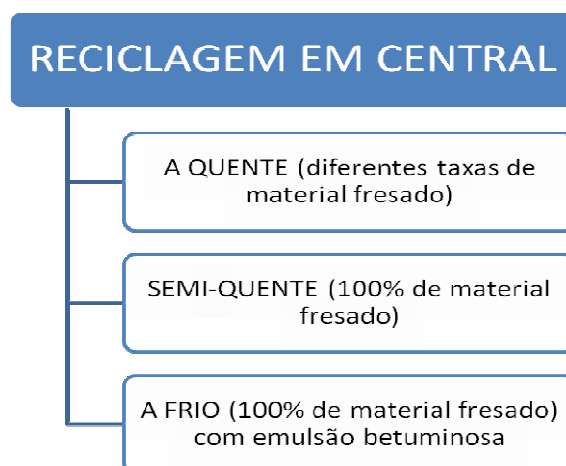


Figura 2. 2: Representação esquemática das técnicas de reciclagem em central.  
Fonte: adaptado de Sánchez (2006, p. 27)

## 2.2 RECICLAGEM A FRIO EM CENTRAL COM EMULSÃO BETUMINOSA

Segundo Batista (2004), a reciclagem de pavimentos a frio é uma técnica, que constitui, comparativamente à solução tradicional de reabilitação de pavimentos (reforço do pavimento com uma camada em mistura betuminosa a quente, após uma eventual fresagem das camadas fendilhadas do pavimento existente), uma solução grandemente atraente do ponto de vista ambiental, pois alia o facto de proporcionar uma significativa redução da emissão de poluentes e poupança de energia com o facto de favorecer a economia de matérias-primas e prevenir a produção de resíduos, uma vez que o pavimento é utilizado como fonte de matéria-prima.

A reciclagem a frio utiliza a técnica da fresagem na qual o pavimento asfáltico é removido a uma profundidade desejada e depois restaurado através do fabrico de uma nova camada superficial. Este método permite a correcção do greide da pista, inclinação, ondulações e deformações na camada superficial. Permite também a possibilidade de se corrigirem problemas de rugosidade superficial, melhorando o atrito entre a superfície de rolamento e os pneus dos veículos, obtendo uma nova camada, de resistência mecânica melhorada em relação à inicial que se encontrava degradada (Lima, 2003 e Gomes, 2005).

As misturas recicladas a frio com emulsão betuminosa, em central, resultam da mistura do material a reciclar e eventuais materiais correctivos, com emulsão betuminosa e água, tal como se apresenta na Figura 2.3.

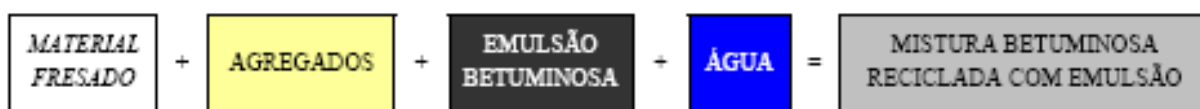


Figura 2. 3: Esquema da obtenção de mistura reciclada a frio com emulsão betuminosa

Fonte: Gomes (2005, p. 11)

Após a fresagem das camadas do pavimento existente, o material é transportado para central onde é misturado com a emulsão betuminosa à temperatura ambiente, seguindo-se o transporte e aplicação na obra, tal como se apresenta na Figura 2.4 (Almeida, 2003).



Figura 2. 4: Esquema do processo de reciclagem em central com emulsão betuminosa  
 Fonte: Baptista (2006, p. 15)

O material fresado pode ser introduzido a frio junto com os agregados ou directamente na unidade de mistura (método a frio). Quando o material fresado não é aquecido, os agregados são mais sobreaquecidos de modo a que a mistura reciclada apresente uma temperatura final adequada. Por isso, nestes métodos, só em condições especiais se consegue ir além de incorporações de 30%. Na Figura 2.5 apresenta-se um esquema de funcionamento de uma central betuminosa descontínua seguindo o método a frio e na Figura 2.6 apresenta-se um esquema de funcionamento de uma central betuminosa contínua a frio.

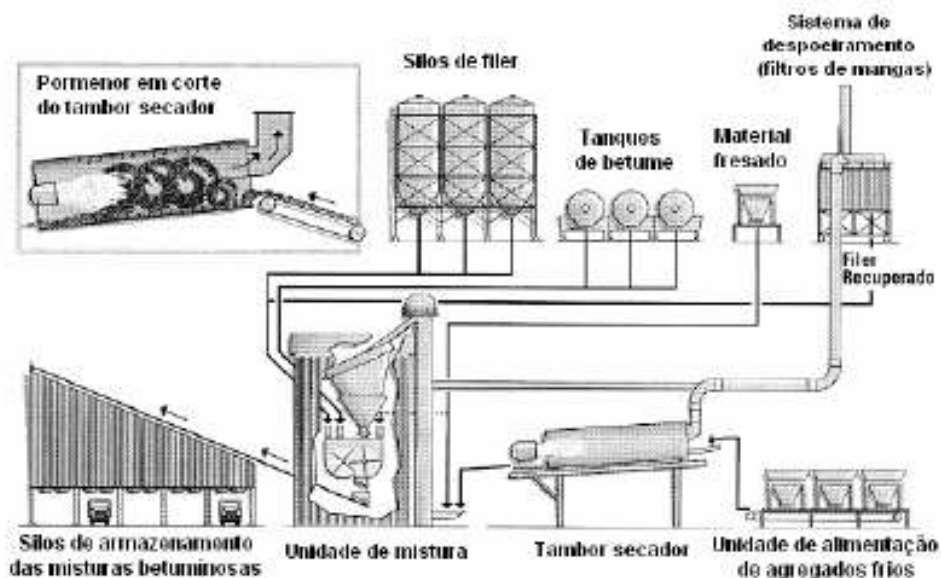


Figura 2. 5: Esquema de funcionamento de central betuminosa descontínua com incorporação de material fresado a frio  
 Fonte: Baptista (2006, p. 22)

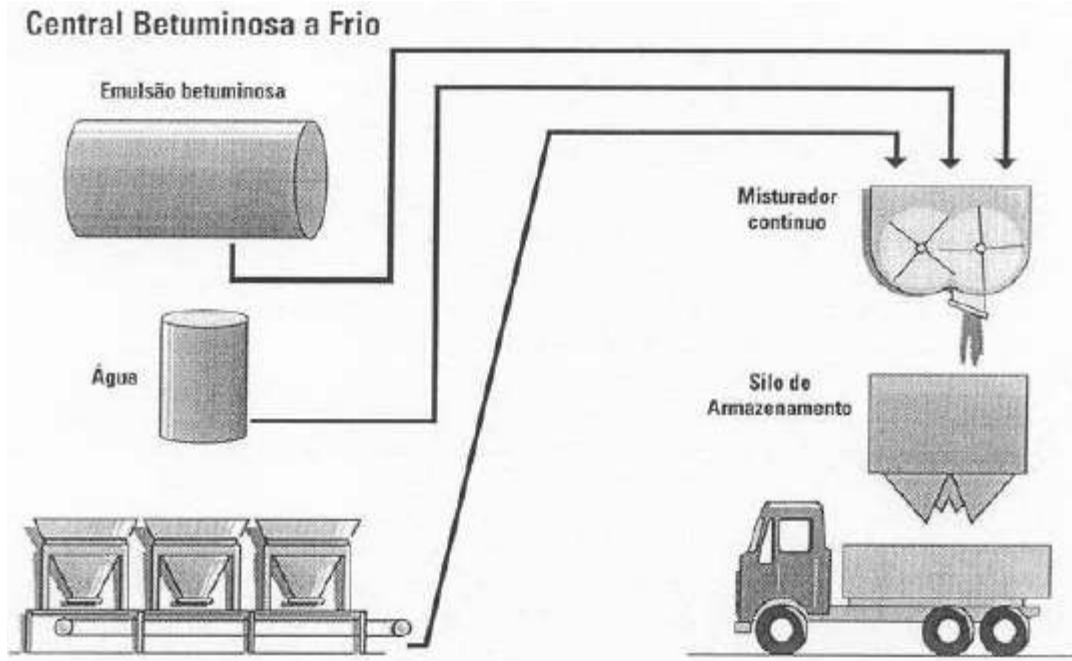


Figura 2. 6: Central betuminosa contínua a frio.  
Fonte: Gomes (2005, p. 29)

No método a frio, existe ainda a chamada central de torre, apresentada na Figura 2.7, em que o material fresado é introduzido a frio directamente na unidade de mistura. Neste tipo de central existe um armazenamento intermédio dos agregados aquecidos, assegurado através de silos localizados por cima da unidade de mistura, correspondendo a cada silo uma determinada fracção granulométrica.

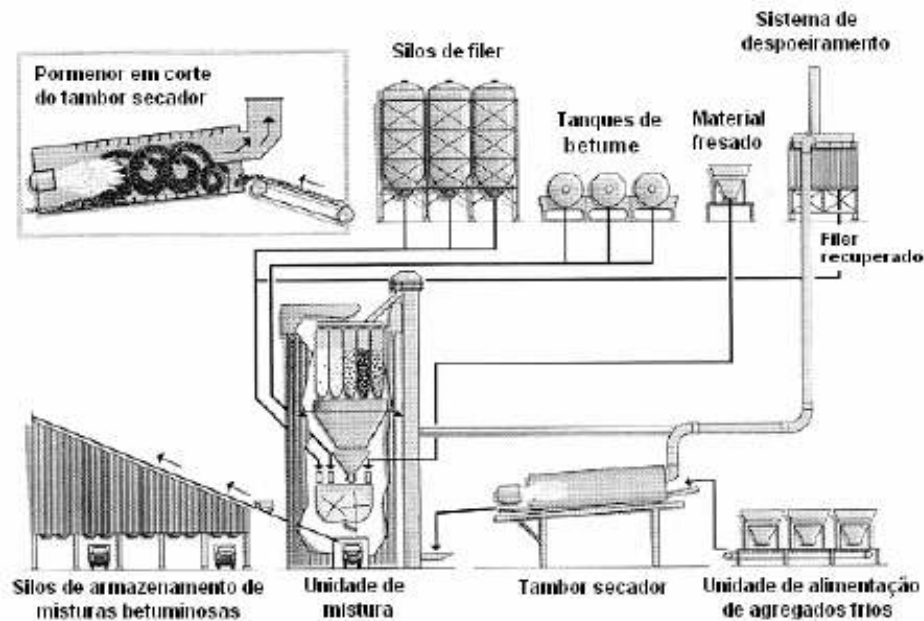


Figura 2. 7: Esquema de funcionamento de central de torre com incorporação de material fresado a frio

Fonte: Baptista (2006, p. 24)

A técnica de reciclagem a frio apresenta as seguintes vantagens (Gomes, 2005):

- Boa resistência à fadiga;
- Facilidade de aplicação;
- Bom conhecimento da indústria rodoviária da emulsão;

Contudo, esta técnica também tem as suas desvantagens, sendo elas as seguintes (Batista, 2006; Páez, Santiago, Muñoz, Moreno & Nunes, 2006; Gomes, 2005):

- Preço, transporta-se também água;
- O teor de humidade do material é por vezes tão elevado que fica saturado com a emulsão;
- A resistência obtém-se com a perda de humidade.
- A abertura ao tráfego da superfície reciclada deve atrasar-se até que se produza a rotura da emulsão devendo ser tomadas as devidas precauções para que a velocidade seja moderada evitando assim deslizamentos e desprendimentos superficiais ou deteriorações de outro tipo.

## 2.3 RECICLAGEM A QUENTE EM CENTRAL COM EMULSÃO BETUMINOSA

A técnica de reciclagem a quente em central tem sido aplicada em algumas obras de reabilitação de pavimentos rodoviários em Portugal. Esta é uma técnica na qual se reconhece uma boa eficiência de ordem económica e ambiental, sendo de esperar um aumento da produção e aplicação de misturas betuminosas recicladas a quente (MBRQ) nos próximos anos.

Os métodos usados na formulação de misturas a quente, regra geral são adaptáveis ao estudo de MBRQ. Contudo, a adaptação desses métodos exige a introdução de novos procedimentos, nas diversas fases do processo de formulação, que considerem a influência das propriedades do material fresado e respectivos componentes, nas características finais da mistura reciclada (Baptista, 2008).

A reciclagem a quente consiste no método no qual o pavimento existente é removido por uma fresadora ou outro equipamento capaz de arrancar a camada superficial total ou parcialmente a uma profundidade previamente estabelecida que é depois transportada para um local de estocagem para que seja reciclada em central (Lima, 2003).

Segundo Gomes (2005), as técnicas a quente desenvolvem-se preferencialmente em central.

A reciclagem de misturas betuminosas a quente em central consiste numa técnica para produção de misturas betuminosas com uma certa percentagem de misturas betuminosas fresadas. A percentagem de misturas betuminosas fresadas incorporadas na mistura a produzir (designada por taxa de reciclagem, TR) varia entre 0 e quase 100 % dependendo do tipo de central e do tipo de mistura a ser produzida.

As misturas betuminosas fresadas devem ser recicladas numa nova mistura com a mesma qualidade das misturas originais, o que do ponto de vista ambiental, constitui o ciclo de construção óptimo.

Com base em estudos da Brisa, citado por Gomes (2005), a execução de uma mistura betuminosa reciclada a quente em central inclui as seguintes operações:

- Armazenamento do material procedente de pavimentos betuminosos envelhecidos;
- Tratamento do material betuminoso a reciclar em bruto;

- Caracterização e armazenamento do material betuminoso a reciclar tratado;
- Estudo da mistura e obtenção da fórmula de trabalho;
- Fabrico da mistura de acordo com a fórmula de trabalho;
- Transporte da mistura ao local de utilização;
- Preparação da superfície sobre a qual se vai espalhar a mistura;
- Espalhamento e compactação da mistura.

O transporte, a preparação da superfície e o espalhamento estabelecem operações perfeitamente análogas às que ocorrem nas misturas tradicionais. As restantes operações envolvem aspectos particulares ligados à técnica da reciclagem a quente (Gomes, 2005).

Em suma, uma MBRQ resulta da combinação de misturas betuminosas envelhecidas desagregadas, normalmente resultantes da fresagem das camadas superiores de pavimentos rodoviários flexíveis, e de materiais novos, agregados e betume, tal como se apresenta na Figura 2.8. Em certos casos é usado um rejuvenescedor do betume existente nas misturas envelhecidas.

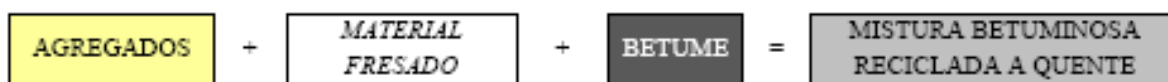


Figura 2. 8 Esquema dos materiais constituintes de uma mistura betuminosa reciclada a quente com betume

Fonte: Baptista (2006, p. 18)

A técnica de reciclagem a quente em central, apresentada na Figura 2.9, baseia-se em fabricar uma mistura betuminosa a quente, utilizando materiais fresados de pavimentos antigos de modo a conseguir bons resultados técnico-económicos e ambientais. Para tal, são adicionados novos materiais correctivos, agregados e betume, de modo a conseguir misturas com desempenho idêntico ao das misturas fabricadas a quente sem incorporação de material fresado (Baptista, 2006).



Figura 2. 9: Esquema do processo de reciclagem a quente em central  
 Fonte: Baptista (2006, p. 17)

As MBRQ podem ser produzidas em centrais descontínuas ou contínuas, desde que sejam preparadas para a introdução do material frescoado, a frio ou aquecido, ou adaptadas para o efeito. No método a quente, esquematizado na Figura 2.10, conseguem-se taxas de reciclagem mais elevadas, que podem atingir os 70%, o material frescoado é aquecido num tambor secador paralelo antes de ser introduzido na unidade de mistura (Baptista, 2006).

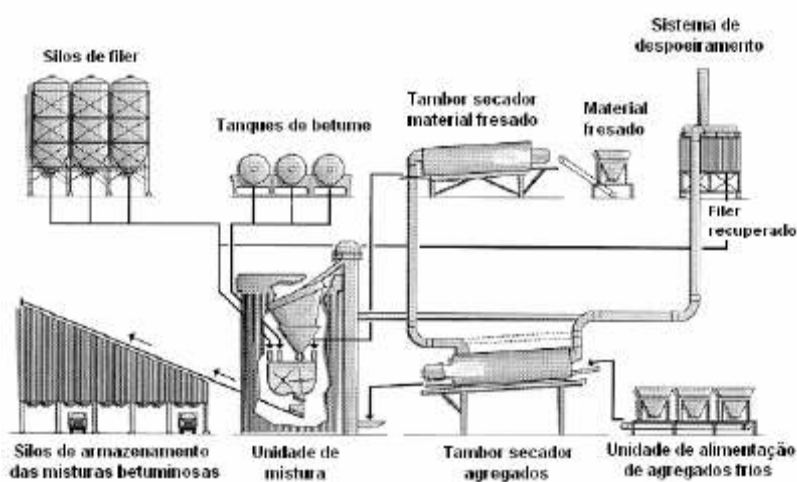


Figura 2. 10: Esquema de funcionamento de central betuminosa descontínua com incorporação de material frescoado a quente  
 Fonte: Baptista (2006, p. 22)

Nas centrais contínuas, antes de adicionar o betume, o material fresado pode ser aquecido, no tambor-secador-misturador (TSM), directamente pelos gases de combustão quentes ou por contacto com os agregados sobreaquecidos. Na Figura 2.11 apresenta-se a configuração genérica duma central contínua adaptada ao fabrico de misturas recicladas a quente (Dueñas, 2008).

Para a produção de MBRQ em central contínua, existem diversas variantes de fabrico, sendo as principais: central com TSM de fluxos paralelos, central com TSM com fluxos contracorrente e a central contínua de tambor duplo (Baptista, 2006).

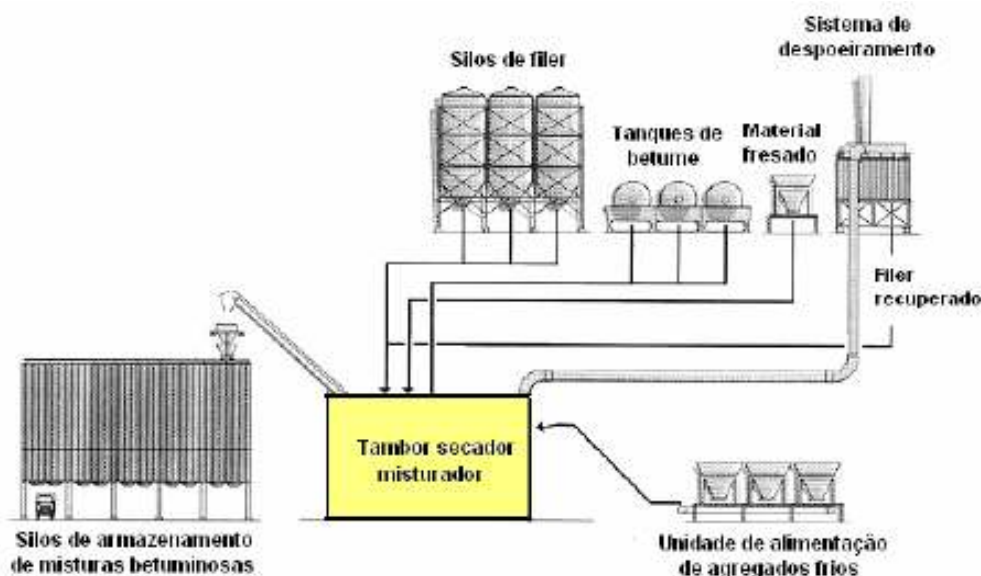


Figura 2. 11: Esquema de central betuminosa contínua adaptada ao fabrico de MBRQ  
Fonte: Baptista (2006, p. 25)

Na central contínua com TSM de fluxos paralelos, apresentada na Figura 2.12, assim designada porque o fluxo dos gases de combustão quentes e dos agregados é o mesmo, existe uma alimentação separada do material fresado que, após processamento, é introduzido num anel localizado na parte central do tambor. Nesta zona, a temperatura dos gases é mais baixa e permite a introdução do material fresado que depois é aquecido por contacto com os agregados sobreaquecidos e pelos gases de combustão quentes (Baptista, 2006).

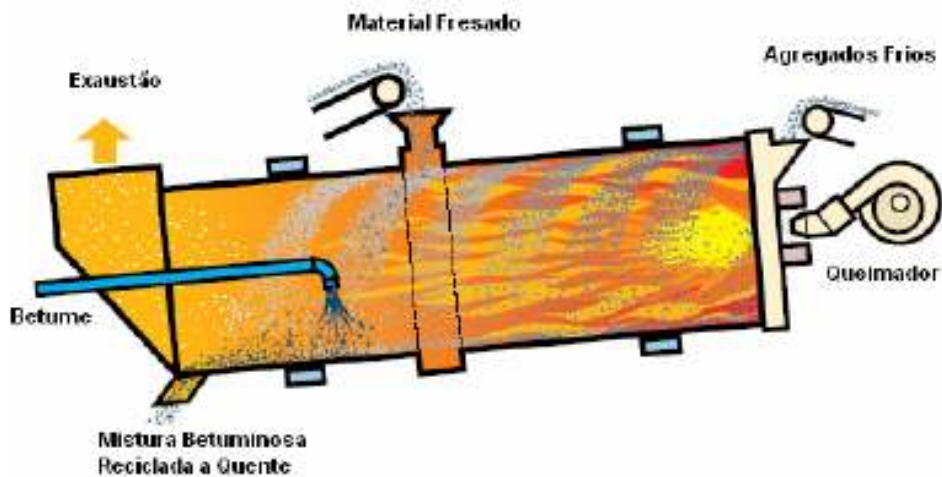


Figura 2. 12: Esquema do TSM de central contínua de fluxos paralelos  
Fonte: Baptista (2006, p. 25)

Na Figura 2.13, mostra-se a solução de TSM de fluxos contracorrente, onde o fluxo dos gases de combustão é oposto ao sentido de deslocamento dos agregados e o queimador localiza-se a montante da zona de introdução do material fresado, ficando assim garantido que o material fresado não contacta directamente com a chama ou com os gases quentes. Assim, o material fresado é aquecido apenas devido ao contacto com os agregados quentes (Baptista, 2006).

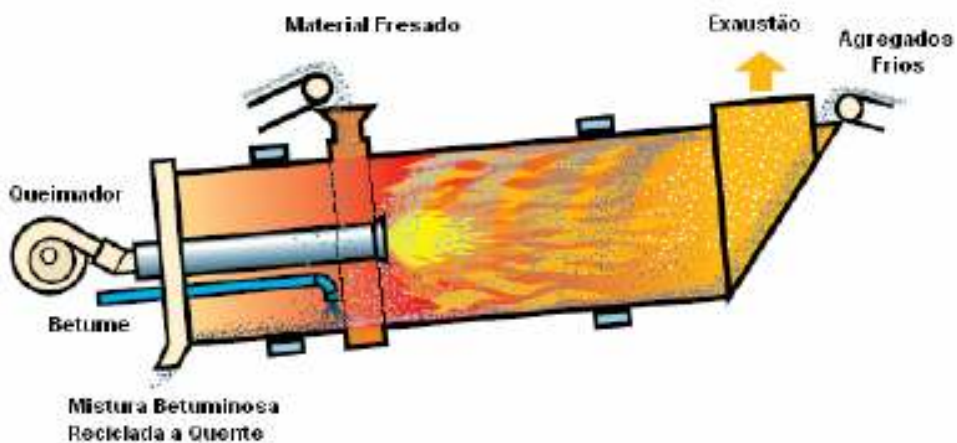


Figura 2. 13: Esquema de TSM de central contínua de fluxos contracorrente  
Fonte: Baptista (2006, p. 26)

Numa central contínua com tambor duplo como a da Figura 2.14, existe um tambor rotativo de fluxos contracorrente que é envolvido por um tambor exterior fixo. O material fresado é introduzido no tambor exterior onde é misturado com os agregados que, depois

de sobreaquecidos no tambor interior, passam para o tambor exterior. Desta forma, o material fresado não entra em contacto com os gases de combustão (Baptista, 2006).

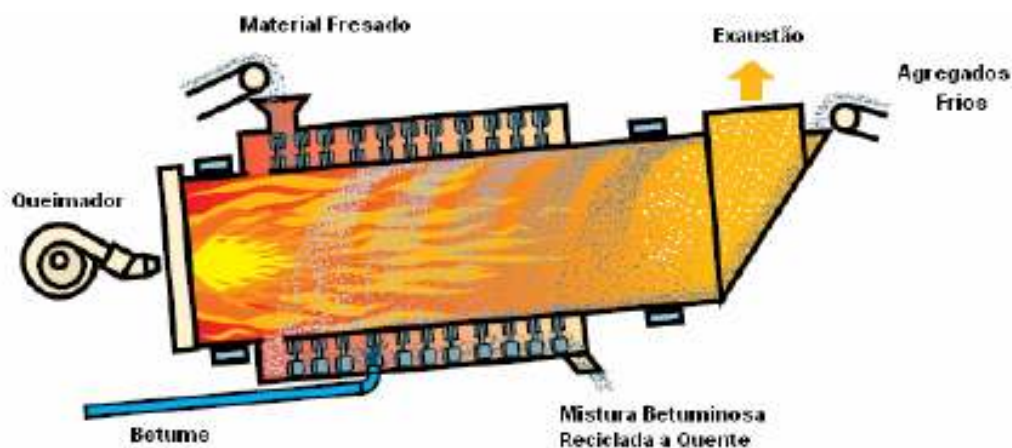


Figura 2. 14: Esquema de central contínua de tambor duplo  
Fonte: Baptista (2006, p. 26)

A reciclagem a quente, além das indiscutíveis vantagens de ordem ambiental, é, na maioria dos casos, tecnicamente viável e economicamente vantajosa. As vantagens desta técnica são as seguintes:

- Ordem económica:
  - Economia ao nível dos agregados e do betume, esta última mais acentuada com o aumento que se tem observado nos últimos anos no preço do petróleo bruto.
- Ordem ambiental:
  - Menor consumo de recursos naturais (betume e agregados);
  - Melhor aplicação dos materiais provenientes da fresagem.

As desvantagens, normalmente associadas à produção, estão relacionadas com a quebra na capacidade de produção das centrais e com o maior aquecimento dos agregados e, portanto, maiores custos energéticos. No entanto, deve dizer-se que, embora a temperatura de aquecimento seja mais alta que o normal, a quantidade de agregados novos também é menor. Esta técnica de reciclagem em central apresenta,

ainda, a condicionante de ser necessário o transporte do material fresado até à central, com o inerente encarecimento (Baptista, 2006; Baptista e Picado-Santos, 2008a; Baptista e Picado-Santos, 2008b; Páez et al., 2006; Baptista, Picado-Santos, Pais & Trabulo, 2004).

## **2.4 RECICLAGEM SEMI-QUENTE EM CENTRAL COM EMULSÃO BETUMINOSA**

Trata-se de uma técnica ainda em desenvolvimento, que vem colmatar algumas limitações das técnicas de reciclagem acima descritas.

A reciclagem semi-quente (RSQ) consiste em reciclar 100 % do material fresado proveniente da obra, aquecendo-o até 80 a 90° C no tambor de uma central a quente, continua o descontinua, para, em seguida, envolver este com uma emulsão betuminosa (Sánchez, 2006).

Desta forma, conseguem-se eliminar os problemas de sobre-aquecimento inerentes à reciclagem a quente, bem como uma melhor compactação que a obtida na reciclagem a frio, tendo em conta a maior temperatura da mistura (Jiménez, 2007).

A mistura betuminosa reciclada a semi-quente (MBRSQ) pode armazenar-se durante 24 horas sempre o seu “espalhamento e compactação” seja realizada a uma temperatura igual ou superior a 60°C. O aquecimento a que foi submetido o material fresado permite que a abertura ao tráfego seja imediata, eliminando, deste modo, o período de cura necessário na reciclagem a frio.

Como qualquer outro tipo de reciclagem devem ser efectuados estudos acerca da mistura fresada, para que se possa concluir acerca da percentagem de emulsão a utilizar (Tavares & Vieira, 2008 e Sánchez, 2006).

Na Figura 2.15 apresenta-se o processo de reciclagem em central para uma técnica de reciclagem semi-quente, na qual o ligante utilizado é uma emulsão betuminosa e onde é possível reciclar a totalidade do material fresado.



Figura 2. 15: Esquema do processo de reciclagem semi-quente em central  
Fonte: Baptista (2006, p. 16)

Segundo Sánchez, 2006, este tipo de reciclagem aproveita as vantagens da reciclagem a frio *in situ* e a quente em central.

Da reciclagem a frio *in situ* tem as seguintes vantagens:

- Taxa de material fresado de 100%;
- Temperatura de aplicação: temperatura ambiental;
- Procedimento ecológico.

Com a reciclagem a quente, têm em comum:

- Poder dosear previamente a mistura;
- Coesão inicial da mistura elevada;
- Não necessita de tempo de cura;

Segundo Kristjansdottir (2006), as vantagens reconhecidas logo de imediato a esta técnica de reciclagem têm a ver com a redução de emissões para a atmosfera, a diminuição do consumo de energia e a diminuição da viscosidade, ou seja:

- **Consumo de energia**

A redução do consumo de energia é o benefício mais notável na produção de MBRSQ e normalmente é tido em conta como um dos dois principais benefícios deste tipo de reciclagem

Estudos efectuados mostraram que a redução do consumo de energia em cerca de 30% pode ser alcançada através da diminuição da temperatura de produção do pavimento. A redução no consumo de energia reduz o custo de produção do pavimento, contudo, podem também ser adicionados custos relativos à utilização do processo de RSQ, isto é, para aditivos e/ou equipamentos de modificação. O valor do custo adicional depende do método de RSQ utilizado.

Outro benefício da redução do consumo de energia é o menor uso e desgaste do pavimento (Kristjansdottir, 2006 e CEPESA, 2008).

- **Emissões**

O outro grande benefício da MBRSQ é a redução das emissões devido à diminuição da temperatura de produção. Segundo a literatura, a produção de semi-quente reduz significativamente as emissões, fumaça e odor, em comparação com uma produção regular de MBRQ. Emissões derivadas da produção de pavimentos e sua colocação podem, em certos níveis elevados, ser prejudiciais à saúde.

Deste modo, a redução das emissões é uma vantagem importante, mas o seu verdadeiro benéfico, na prática, para os produtores e compradores é totalmente dependente da consciência ambiental e dos regulamentos de cada país (Kristjansdottir, 2006).

- **Viscosidade**

A funcionalidade da tecnologia da RSQ é baseada na redução da viscosidade do ligante betuminoso numa determinada gama de temperaturas. A redução da viscosidade permite que o agregado seja totalmente revestido a uma temperatura mais baixa do que aquilo que é tradicionalmente exigido na produção de misturas betuminosas a quente, permite uma boa trabalhabilidade durante a colocação e compactação da mistura e permite, também, uma boa durabilidade durante a exposição ao tráfego (entrada em serviço).

Devido à reduzida viscosidade, o processo de compactação pode funcionar como uma ajuda, apresentando vantagens, tais como, fácil manuseio, prorrogação do tempo de pavimentação e redução no uso de rolos compactadores.

As desvantagens da RSQ estão relacionadas, principalmente, com a resistência e questões de susceptibilidade à água, contudo, isso varia dependendo de cada método e podem ser atenuados com o uso de agentes anti-stripping (Kristjansdottir, 2006).