

NOVAS TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO DE PAVIMENTOS*

New Techniques for the Restoration of Pavements

por

LUÍS FERREIRA BARBOSA**

RESUMO — Procede-se a uma apresentação sumária das modernas técnicas disponíveis para a recuperação de pavimentos flexíveis, começando por se indicar a correspondente terminologia adoptada no XVII Congresso Mundial de Estrada (Sidney — 1983). Descreve-se seguidamente como se desenvolveram as novas técnicas.

Faz-se uma descrição dos 3 tipos de técnicas disponíveis: remoção de materiais, recuperação de pavimentos *in situ*, reciclagem de pavimentos em central. Indicam-se os equipamentos utilizados nas diferentes técnicas. Apresenta-se a via a seguir nos estudos técnicos e económicos a efectuar antes de uma reciclagem em central.

SYNOPSIS — This paper reports on the modern techniques used for the restoration of flexible pavements, beginning with the terminology adopted at the XVII World Road Congress (Sidney 1983). Explains how new techniques have been developed.

Describes three types of available techniques: removal of materials, restoration of *in situ* pavements and plant recycling of pavements. Indicates the equipment used in the different techniques.

Presents guidelines concerning the economical and technical studies to be carried out before the plant recycling of pavements.

1. — INTRODUÇÃO — TERMINOLOGIA

Tradicionalmente a manutenção e a melhoria do estado dos pavimentos flexíveis era efectuada aplicando-lhes uma recarga de betão betuminoso, mais ou menos espessa, sem se actuar no pavimento existente.

Nos últimos 10 anos têm vindo a surgir novas técnicas de recuperação de pavimentos que recorrem ao levantamento das misturas e à aplicação de novas camadas betuminosas, em que, em geral, entram as próprias misturas betuminosas removidas do pavimento antigo, em conjunto com agregados e betumes novos, que lhe são adicionados para correcção e melhoria das suas propriedades. Tais técnicas têm tido uma grande expansão, tanto na Europa, como na América, estando actualmente em vias de introdução em Portugal.

* Trabalho recebido em Janeiro de 1986. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

** Engenheiro Civil, Professor Auxiliar Convidado da Cadeira de Aeródromos do I.S.T. (Instituto Superior Técnico).

Sempre que se inicia a aplicação de uma nova técnica não há um vocabulário fixo, adoptando os diferentes construtores vocabulários próprios e que consideram mais atractivos para a clientela potencial.

Em geral, esta confusão de terminologia traduz e gera uma certa confusão de ideias, tornando difícil a comunicação entre os interessados no assunto.

A fim de se evitarem equívocos fixou-se no XVII Congresso Mundial de Estradas, em Outubro de 1983, em Sidney, o vocabulário a adoptar relativo às novas técnicas introduzidas.

De acordo com a terminologia aprovada, as novas técnicas de recuperação das camadas superficiais dos pavimentos flexíveis podem ser dos três tipos distintos seguintes: técnicas de remoção de materiais, técnicas de recuperação *in situ* e técnicas de reciclagem em central.

Dentro dos dois primeiros tipos de técnicas enunciadas, admitem-se as seguintes modalidades distintas:

- Técnicas de remoção de materiais
- Aplanamento
- Fresagem
- Técnicas de recuperação *in situ*
- Termoreperfilagem
- Termoregeneração
- Reciclagem *in situ*

As duas diferentes modalidades de remoção de materiais distinguem-se da seguinte forma:

- Aplanamento. (Planning, rabotage)

Remoção de materiais betuminosos, numa dada espessura, por meio de uma lâmina cortante, em geral após aquecimento dos materiais.

- Fresagem (Milling, fraissage)

Desagregação e remoção de materiais betuminosos, numa dada espessura, por meio da acção de um tambor rotativo de eixo horizontal equipado com peças cortantes. A operação pode-se efectuar com ou sem aquecimento dos materiais.

As três diferentes modalidades de recuperação *in situ* distinguem-se da seguinte forma:

- Termoreperfilagem (Reforming, thermoreprofilage)

Correcção do perfil de um pavimento betuminoso por aquecimento, escarificação, nivelamento e compactação, sem remoção de materiais nem aplicação de misturas betuminosas novas.

- Termoregeneração (Repaving, thermoregeneration)

Correcção do perfil de um pavimento betuminoso (com remoção eventual dos materiais) por aquecimento, escarificação (numa espessura superior à dos

materiais removidos) regularização, espalhamento de uma nova camada fina de misturas betuminosas e compactação.

— Reciclagem *in situ* (Remixing, recyclage en place)

Melhoria das propriedades de uma camada superficial existente, por aquecimento, escarificação (com remoção eventual de parte dos materiais), mistura com as necessárias correcções de formulação (com adição de agregados, de ligante ou de mistura de agregados e ligante) e adição eventual de um agente rejuvenescedor do ligante, espalhamento da mistura e compactação.

A reciclagem em central consiste no tratamento em central de uma mistura betuminosa existente, tendo em vista a sua reutilização, com a adição, em percentagens variáveis, de agregados e ligante novos e com adição eventual de um agente rejuvenescedor do ligante. As misturas betuminosas recuperadas podem ser provenientes de operações de aplanamento ou fresagem, de operações de termogeneração, ou ainda de outros tipos de intervenções executadas sobre os pavimentos.

Do que fica exposto se infere que só se deve utilizar o termo reciclagem, quando há uma correcção de formulação de misturas existentes, por meio da adição de materiais novos, tendo em vista a obtenção de uma mistura reciclada de características análogas às das misturas novas. É pois de evitar a utilização genérica da expressão reciclagem *in situ*, para designar indistintamente as várias técnicas de recuperação *in situ* atrás discriminadas. De facto, tanto a termoreperfilagem, como a termogeneração não originam qualquer reciclagem dos materiais.

2. — DESENVOLVIMENTO DAS NOVAS TÉCNICAS

O aumento constante da quilometragem das redes de estradas e da intensidade do tráfego, fizeram com que a manutenção dos pavimentos tivesse uma importância crescente. Enquanto que há alguns anos as verbas destinadas às novas construções eram nitidamente superiores às destinadas à manutenção, nota-se hoje em dia, nos países mais desenvolvidos, uma nítida tendência para a inversão desta relação. Sem uma manutenção eficiente e atempada corre-se o risco de, a curto prazo, os elevados capitais investidos na construção das estradas estarem praticamente perdidos, devido à rápida degradação das mesmas.

Por outro lado as exigências dos condutores quanto às condições de conforto e segurança que lhes são oferecidas nas estradas, no sentido de se manter o nível de serviço no espaço e no tempo, têm levado a concluir, que é social e economicamente mais rentável, manter em permanência as estradas em bom estado, do que proceder apenas à sua reparação, quando já se verificam indícios notáveis de ruína nas mesmas.

Para responder a esta necessidade permanente de manutenção melhoram-se, por um lado, as técnicas de manutenção tradicionais e surgiram, por outro lado, as novas técnicas, que tiram o melhor partido possível das camadas superficiais degradadas, reutilizando, total ou parcialmente, os seus materiais constitutivos.

Actualmente os conhecimentos que já se possuem acerca das novas técnicas de recuperação das camadas superficiais betuminosas dos pavimentos são tais, que tornam essas técnicas quase sempre competitivas, quando comparadas com as técnicas tradicionais de manutenção.

Tal como acontece na maioria dos casos, a introdução e a generalização das técnicas de recuperação de pavimentos deparou com vários obstáculos. Era um processo novo, a tecnologia e o equipamento necessários não estavam ainda suficientemente desenvolvidos e, em muitos casos, as novas técnicas não eram economicamente compensadoras.

Os tempos no entanto mudaram, estando, actualmente, estas técnicas a ser já aplicadas em larga escala, prevenindo-se a continuação da sua rápida expansão a nível mundial. A mudança de atitude dos engenheiros em relação a esta questão ficou-se a dever a vários factores. Inicialmente recorreu-se às novas técnicas por razões ambientais. Em geral a reconstrução de um pavimento de estrada consistia, na sua demolição, transporte dos produtos resultantes e vazadouro e execução de um novo pavimento. Os produtos resultantes não tinham qualquer utilidade e era cara a obtenção dos vazadouros e o transporte para os mesmos. As novas técnicas, permitindo utilizar sistematicamente os materiais do pavimento antigo, eliminavam o problema dos vazadouros e reduziam substancialmente a quantidade de materiais novos a aplicar, dos quais não existem reservas ilimitadas e cujos preços têm apresentado uma subida constante. Passou-se pois de uma atitude de esbanjamento para uma atitude de aproveitamento.

A crise do petróleo de 1973, com o conseqüente aumento do seu preço, veio mostrar claramente, que o consumo dos betumes tinha de passar a ser mais parcimonioso. Tornou-se, por outro lado, ainda claro que é cada vez mais cara e difícil a obtenção de agregados de boa qualidade, tendo também o seu preço subido substancialmente.

Após a crise de petróleo referida as novas técnicas de recuperação de pavimentos começaram a expandir-se. Tal expansão a princípio foi lenta, por falta de tecnologia e de equipamentos adequados. Nos últimos anos, porém, a tecnologia desenvolveu-se até um ponto tal, que a recuperação dos pavimentos passou de um estágio experimental, para um estágio em que é considerada uma alternativa válida aos processos de pavimentação tradicionais. Desenvolveu-se equipamento que permite a remoção de materiais do antigo pavimento e a sua mistura com novos agregados, betume e agentes rejuvenecedores do betume, para produzir uma mistura betuminosa reciclada de características análogas às de uma mistura nova. Existem ainda problemas peculiares das novas técnicas, no entanto, o seu número e complexidade foram reduzidos substancialmente nos últimos anos.

Conclui-se pois que foram problemas económicos e ambientais, que levaram à aparição das novas técnicas de recuperação dos pavimentos e foi o incremento de novas tecnologias e equipamentos, que permitiu a sua rápida expansão. Para se ter uma ideia desta expansão pode-se dizer que na maioria dos países da Europa a fresagem e a termogeneração já entraram na prática corrente dos trabalhos de manutenção de estradas.

Quanto à reciclagem em central, o seu progresso tem sido bastante mais lento. A primeira obra com reciclagem em central parece ter-se efectuado em 1974, nos E.U.A., num troço da Interstate 15, perto de Sloan, no Nevada. Em 1978 já se tinham efectuado nos E.U.A. 27 obras importantes com reciclagem em central. Estima-se, que tonelagem de misturas recicladas, aplicadas nos E.U.A. em 1981, foi de 12 000 000, o que representava porém apenas cerca de 4% do total de 300 000 000 de toneladas aplicadas. No entanto, cerca de 60% das centrais de betão betuminoso actualmente vendidas nos E.U.A. estão equipadas para fazer reciclagem de misturas.

Na República Federal da Alemanha, em 1978, realizou-se a primeira obra de reciclagem, num troço de ensaio de 2 km de extensão na auto-estrada A 48 (Frankfurt-Kassel), perto de ReisKirchen, no estado de Hesse. No ano seguinte, na mesma auto-estrada, executou-se um segundo troço de 10 km. Depois disso a reciclagem em central não teve grande expansão, usando-se, essencialmente, a reciclagem com baixas taxas de recuperação de material antigo, feita, em geral, em centrais tradicionais.

Na Holanda iniciaram-se as reciclagens em central em 1980, com a recuperação e reciclagem de 300 000 toneladas de misturas betuminosas num programa trienal então lançado.

Na Finlândia iniciou-se experimentalmente, a reciclagem em central em 1980, com elevada taxa de recuperação de materiais. Face aos bons resultados obtidos várias municipalidades começaram a organizar a «stockagem» sistemática dos materiais removidos das estradas, a fim de os reciclar posteriormente.

Em França a reciclagem em central iniciou-se em 1980 com vários ensaios em Blois. Em 1981 executaram-se cinco obras utilizando esta técnica e, a partir desse ano, tem-se continuado a verificar a sua expansão, tendo-se realizado logo em 1982 sete grandes obras, com um acréscimo de tonelagem de 30% em relação a 1981.

No que se refere a aeroportos a evolução tem sido um pouco mais lenta tendo-se constatado a tendência para a utilização das misturas recicladas preferencialmente em camadas de base. Foi o que se verificou, por exemplo, no aeroporto Leonardo da Vinci, em Roma. Esta utilização cautelosa das novas técnicas, evitando-se a sua aplicação nas camadas mais nobres do pavimento deve-se, provavelmente, à falta de informação ainda existente sobre o comportamento a longo prazo das misturas recicladas. A força aérea americana tem tido um papel importante na execução de reciclagem de pavimentos de aeródromos, tendo já executado em 1982 a reciclagem dos pavimentos aeronáuticos de três bases aéreas.

3. — TÉCNICAS DE REMOÇÃO DE MATERIAIS

Das duas técnicas de remoção de materiais anteriormente referidas, a mais utilizada é, sem dúvida, a fresagem. O aplanamento com lâmina está praticamente abandonado, visto ter de realizar-se a quente, com elevado consumo de energia, ser de difícil execução e dar origem a blocos de material betuminoso, que têm de ser desagregados por britagem, antes de qualquer possível reutilização.

A fresagem pode-se efectuar a frio ou a quente e tem a vantagem dos seus produtos poderem ter uma reutilização imediata. A fresagem a quente permite maiores rendimentos devido ao amolecimento do material. No entanto, torna-se difícil fazer a recolha dos materiais quentes, não se levantando porém esta dificuldade no caso da máquina de fresagem estar equipada com um tapete transportador, que descarrega directamente os materiais dentro dos camiões, que os levarão para os locais de depósito. Se nos locais de depósito se formam montes de grande altura com os produtos da fresagem e se os mesmos produtos estão quentes, verifica-se, devido ao peso próprio dos materiais, uma tendência para a sua agregação, o que é um inconveniente, por obrigar, eventualmente, a uma operação adicional, a desagregação por britagem, antes de se proceder à reutilização dos materiais. Mesmo com a fresagem feita a frio, se se formarem depósitos de grande altura, há uma tendência para a agregação, sendo esta mais acentuada em zonas de clima quente. Para obstar à agregação deve-se evitar a formação de depósitos com mais de 3 metros de altura e recomenda-se, no caso de fresagem a quente, a adição de um solvente, em pequena quantidade, antes de descarga dos produtos nos depósitos.

Tendo em vista a reutilização dos produtos de fresagem, deve o depósito dos mesmos, ser feito por lotes homogêneos, a fim de garantir a uniformidade das misturas recicladas que se fabricarem a partir deles.

Pelas razões atrás expostas verifica-se, actualmente, uma tendência para a utilização generalizada da fresagem a frio.

A fresagem dos pavimentos betuminosos dá origem a uma superfície estriada, o que é vantajoso, não só por originar condições de segurança para a circulação de veículos antes da colocação de uma nova camada betuminosa, mas também para melhorar a ligação entre esta camada e a camada antiga. A fresagem deve terminar varrendo-se a superfície fresada, para eliminar os elementos finos que ficam no local.

As máquinas de fresagem são equipamentos automotores de rasto ou de rodas. A fresa está colocada horizontalmente na parte inferior do chassis, sendo o seu eixo perpendicular à direcção de marcha. Os dispositivos de fixação da fresa ao chassis permitem regular a profundidade do corte, bem como a inclinação transversal, o que permite a correcção de perfis transversais. Algumas máquinas de fresagem a frio são providas de dispositivos de rega na parte anterior, para humedificação do material durante o corte, eliminando-se assim as poeiras provocadas pela acção dos dentes e arrefecendo-se os mesmos dentes, o que faz diminuir o seu desgaste.

Na Fig. 1, apresenta-se esquematicamente uma máquina de fresagem de grandes dimensões, com tapete transportador dos produtos de fresagem para carga directa em camiões. Os camiões deslocam-se, ou em marcha atrás, seguindo a máquina, ou ao lado da máquina, em marcha à frente, no caso do braço do tapete transportador poder ser rodado lateralmente.

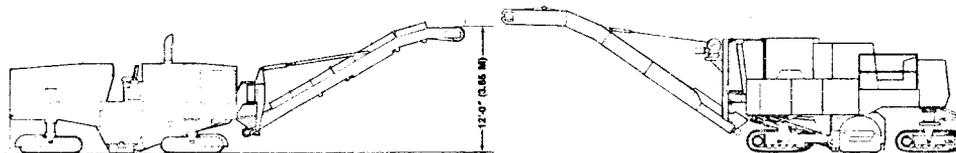


Fig. 1 — Máquina de fresagem com tapete transportador

As máquinas de fresagem dividem-se, em geral, em três tipos, de acordo com o indicado no quadro seguinte:

FRESADORAS

TIPO	LARGURA	RENDIMENTO	PROFUNDIDADE DE CORTE
PEQUENA	30-50 cm	400-600 m ² /dia	4-5
MÉDIA	80-120 cm	1000-2000 m ² /dia	4-5 cm
GRANDE	200-380 cm	6000-7000 m ² /dia	5-7 cm (máx. 10 cm)

As variáveis que mais condicionam o rendimento destas máquinas são a temperatura, a profundidade do corte, o número de dentes da fresa e o seu desgaste, que depende da natureza do material a fresar, (natureza dos agregados, teor e dureza do betume).

Quando as máquinas trabalham a grande velocidade obtêm-se produtos com uma granulometria mais grossa, quando diminui a velocidade obtêm-se uma granulometria mais fina.

As aplicações possíveis da fresagem são múltiplas, desde a recuperação de vias de lentos com rodeiras acentuadas, que foi uma das primeiras aplicações desta técnica, até ao tratamento de superfícies, que apresentam exsudação de betume ou agregados polidos, para melhoria da sua resistência às derrapagens.

Nas Fig.^s 2 a 6 apresentam-se esquematicamente algumas das principais aplicações desta técnica.

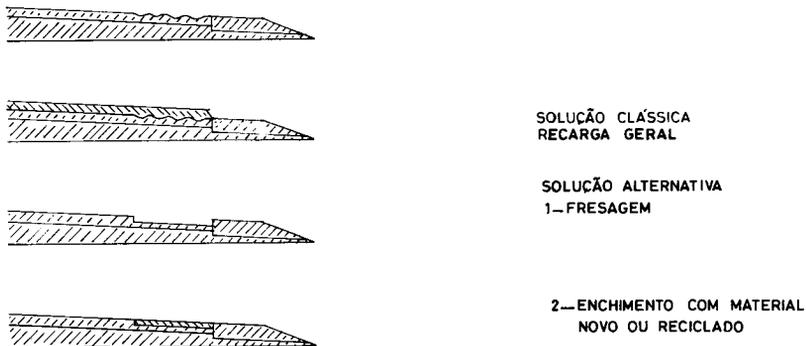


Fig. 2 — Rodeiras em vias de lentos.

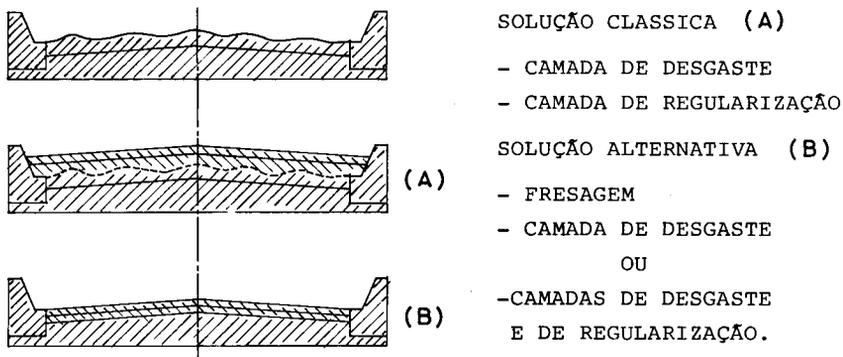


Fig. 3 — Rodeiras em arruamentos ou em estradas de duas vias.

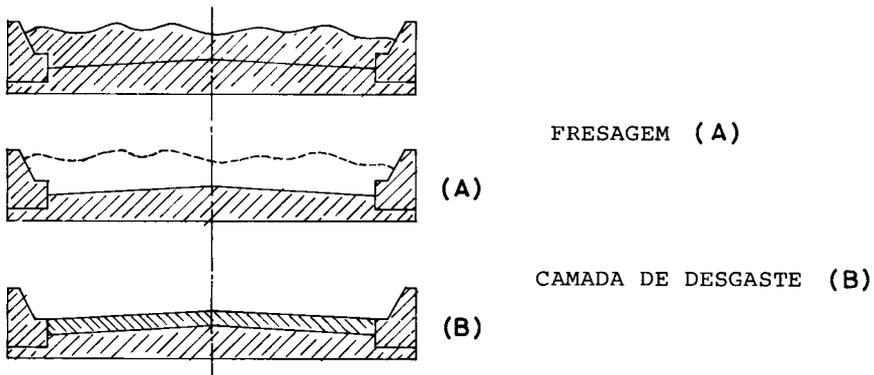


Fig. 4 — Pavimento com sucessivas recargas e com grande irregularidade superficial. Passagens superiores e inferiores.

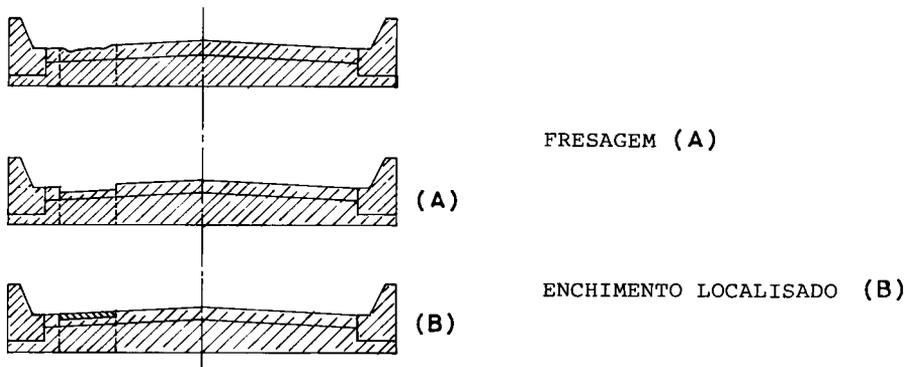


Fig. 5 — Assentamentos dos pavimentos de trincheiras

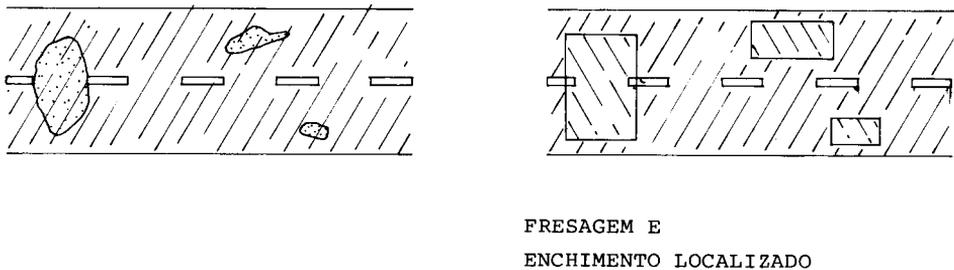


Fig. 6 — Reparações em áreas limitadas.

4 — TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO «IN SITU»

As técnicas de recuperação *in situ* são aplicáveis no âmbito da manutenção dos pavimentos, podendo apenas ser aplicadas em secções que conservaram uma boa resistência estrutural e que apresentam apenas defeitos superficiais.

A termoreperfilagem corrige o perfil transversal do pavimento, sem regenerar a mistura betuminosa que é trabalhada. A termoregeneração permite a colocação de uma camada superficial nova de muita pequena espessura. A reciclagem *in situ* regenera as misturas betuminosas existentes na totalidade da espessura tratada.

4.1 — Termoreperfilagem

Na termoreperfilagem faz-se um regulação da superfície dos pavimentos, restituindo-lhes os seus perfis originais, por meio de um aquecimento, escarificação, regularização ou nivelamento da superfície e recompactação. Não há, nem adição, nem remoção de materiais. A escarificação e a regularização permitem uma certa rehomogeneização do material.

O tapete existente é amolecido, por aquecimento a cerca de 160°, por meio de painéis radiadores de infra-vermelhos, evitando-se assim a incidência directa da chama sobre o tapete. A transmissão do calor faz-se por difusão, para baixo, a partir da superfície. Os painéis radiadores podem ser regulados em larguras por meio de adição ou supressão de elementos, e em altura. O combustível utilizado é o propano.

A escarificação é feita com um «pente», cujos dentes penetram, em geral, cerca de 4 cm no tapete previamente amolecido por aquecimento, sem quebra dos agregados e, conseqüentemente, sem alteração da granulometria.

A regularização dos perfis é feita, ou com um parafuso sem fim, ou com uma lâmina repartidora animada de um movimento lateral.

Na parte traseira das máquinas de termoreperfilagem existe uma mesa vibradora acabadora, análoga às da máquinas espalhadoras clássicas, que dá uma pré-compacção ao material. A compactação final é a tradicional, sendo executada, com cilindros vibradores, de pneus e estáticos de rasto metálico e liso.

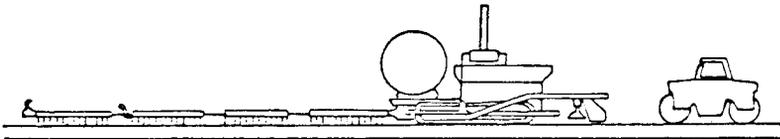


Fig. 7 — Trem de termoreperfilagem

Esta técnica só permite o tratamento de defeitos superficiais de pequena grandeza, pelo o que não tem tido grande expansão fora da Alemanha, país de onde é originária.

Na Fig. 7 apresenta-se esquematicamente um trem de termoreperfilagem.

4.2. — Termoregeneração

A termoregeneração difere essencialmente da termoreperfilagem pelo facto de se aplicar sobre a camada superficial original, depois do seu aquecimento, escarificação e regularização, uma camada de materiais novos de pequena espessura. No caso de se pretenderem respeitar as cotas originais do pavimento, tem de se remover parte do material escarificado, numa altura equivalente à da camada nova a aplicar. Sendo admissível um ligeiro aumento das cotas, tal remoção é desnecessária.

A altura mínima da camada de material novo pode descer teoricamente até 1 cm, o que corresponde a cerca de 25 kg de mistura nova por metro quadrado. Dadas as dificuldades do espalhamento uniforme de uma tão pequena quantidade de material, trabalha-se, em geral, com quantidades de 40 a 50 kg por metro quadrado, o que corresponde a cerca de 2 cm espessura.

Em geral, na termoregeneração emprega-se um menor número de painéis radiadores para o aquecimento, do que na termoreperfilagem, visto se ir colocar sobre o pavimento antigo escarificado uma camada nova, de cujas massas estão a uma temperatura elevada. No entanto, em climas frios utiliza-se à frente da máquina de termoregeneração uma unidade de pré-aquecimento.

Tal como as espalhadoras tradicionais, possui a máquina de termoregeneração, na sua parte dianteira, uma cuba par recepção das massas-betuminosas, que são levadas para a parte traseira por meio de um tapete transportador, onde são espalhadas e pré-compactadas pela mesa vibradora. Apesar de o novo tapete aplicado ter, em geral, apenas 2 cm de espessura, não se levantam problemas da sua ligação à camada inferior, visto esta ser aquecida a escarificada e se proceder à compactação das duas camadas em conjunto.

Na Fig. 8 apresenta-se esquematicamente um trem de termoregeneração.

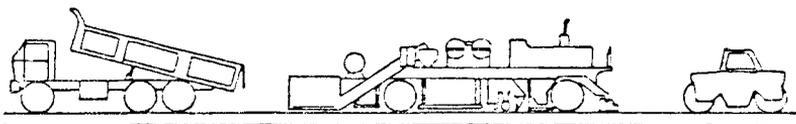


Fig. 8 — Trem de termoregeneração

Na Fig. 9 apresenta-se em pormenor uma máquina de termoregeneração.

Nas máquinas de termoregeneração podem-se montar, eventualmente, dispositivos de pulverização, para espalhar, sobre as misturas betuminosas escarificadas e que permanecem no local, agentes rejuvenescedores do betume.

Esta técnica tem como objectivo restituir a impermeabilidade, a homogeneidade e a rugosidade a um pavimento usado ou escorregadio, restituindo-lhe o perfil transversal inicial nos casos em que houve formação de rodeiras.

Dado a termoregeneração permitir manter as cotas iniciais do pavimento, torna-se particularmente interessante em tratamentos parciais (vias de lentos), em pontos particulares (sob e sobre obras de arte) e sempre que uma elevação de cotas implica gastos adicionais importantes (lancis de passeios, ilhéus direccionais, bermas).

A termoregeneração, com todas técnicas, tem os seus limites de aplicação. Não deve ser utilizada em condições meteorológicas adversas, exige uma espessura mínima com um betume muito duro, não é adequada em estruturas com uma resistência insuficiente, nem no caso dos perfis transversais se encontrarem muito deformados.

Na execução deste tipo de trabalho há dois tipos de controlo que se devem efectuar: o controlo do fabrico das massas novas e o controlo do funcionamento do estealeiro. O primeiro é análogo ao controlo clássico da composição das misturas betuminosas, o segundo incide sobre as temperaturas, as quantidades de misturas novas aplicadas e a compactação.

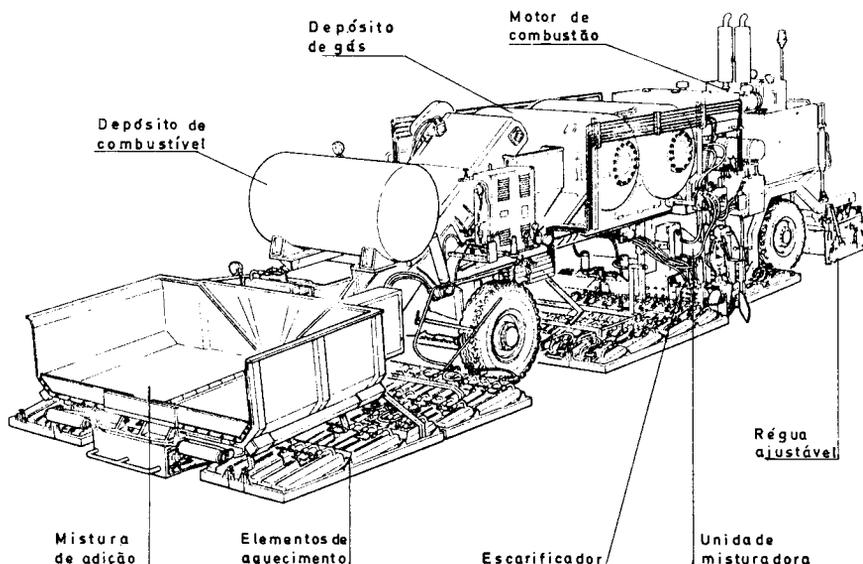


Fig. 9 — Máquina de termoregeneração

4.3 — Reciclagem «in situ»

Esta técnica é um sucedâneo lógico da técnica anterior, diferindo dela, essencialmente pelo facto de se substituir a colocação de material novo sobre a superfície do pavimento, por uma mistura dos agregados e ligantes novos com os materiais do pavimento antigo, corrigindo assim a sua formulação e rejuvenescendo-o. Continua a executar-se o aquecimento e a escarificação do pavimento antigo, sendo os produtos resultantes encaminhados para um misturador, onde se faz a amassadura com os materiais novos. O espalhamento da nova mistura e a sua compactação são análogos aos da construção de um pavimento novo.

Os equipamentos utilizados nesta técnica são análogos aos da termoregeneração, dispondo porém o misturador de dois acessos independentes que permitem a entrada em separado dos materiais novos e antigos. Pode existir uma bomba doseadora para introduzir no misturador um agente rejuvenescedor do ligente.

Na Fig. 10 apresenta-se esquematicamente uma máquina de reciclagem *in situ*.

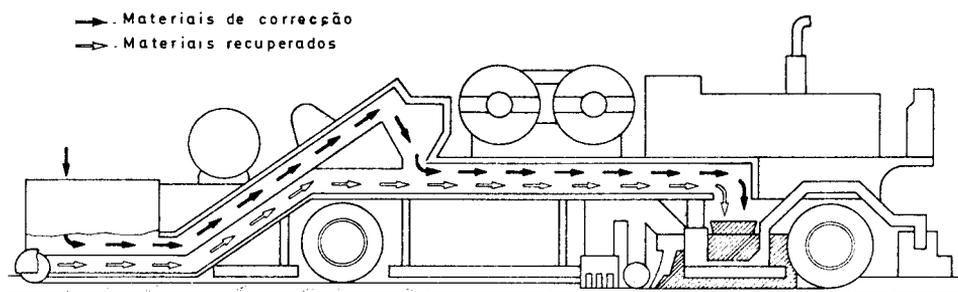


Fig. 10 — Esquema de uma máquina de reciclagem «in situ»

Na Fig. 11 apresenta-se esquematicamente um trem de reciclagem *in situ*.

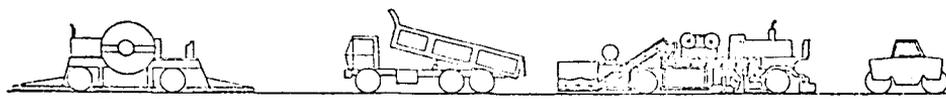


Fig. 11 — Trem de reciclagem «in situ»

A reciclagem *in situ* apresenta sobre a termoregeneração as vantagens de permitir resolver problemas de formulação e de envelhecimento do pavimento antigo.

Tal como na termoregeneração é necessária na reciclagem *in situ* a execução de um controlo dos trabalhos.

Antes do início dos trabalhos deve-se fazer uma análise completa da mistura antiga, a fim de determinar a composição exacta da mistura correctora (granulometria, teor do ligante). Deve-se determinar a baridade, a granulometria e o teor do ligante da mistura antiga, bem como a penetração do ligante antigo.

O tipo e a dosagem dos agentes correctores (ligante e/ou agente rejuvenescedor) determinam-se a partir do conhecimento da penetração do betume antigo e da penetração final desejada.

A formulação da mistura correctora é função da granulometria final desejada, da granulometria da mistura antiga e da percentagem da mistura correctora na mistura final.

A fase de estudos laboratoriais termina com a verificação das características mecânicas da mistura final ou regenerada.

4.4 — *Comparação das diferentes técnicas*

A termoreperfilagem parte do princípio de que, apesar de o material ter sofrido alguma degradação, é ainda bom, pelo que, sem lhe introduzir qualquer alteração, se restitui o perfil inicial ao pavimento. Corrigem-se os efeitos da degradação, mas não se atacam as suas causas. O caso típico de aplicação desta técnica é o de um betão betuminoso com uma boa granulometria, mas com um betume demasiado mole, que permitiu a formação de rodeiras. Admite-se, que o envelhecimento já sofrido pelo betume e o envelhecimento suplementar devido ao aquecimento do pavimento durante a termoreperfilagem, originarão um comportamento melhor que o inicial.

Na termoregeneração admite-se que se o material sofreu degradações, foi porque a sua qualidade não era perfeita, devendo pois ser corrigida pela adição de um material novo. Admite-se porém a hipótese implícita de que os defeitos só são significativos na parte superficial, daí se conservar a mistura antiga abaixo de uma certa profundidade, colocando-se à superfície uma camada de mistura nova.

Com a reciclagem *in situ* leva-se o processo de correcção até ao extremo, corrigindo a mistura existente, não apenas à superfície, mas também na sua massa, com a adição de agregados e ligante, depois de uma análise da sua composição actual. As possibilidades efectivas de correcção são porém limitadas, até porque a correcção granulométrica dos agregados e a correcção do ligante não são independentes. Se não fôr, por exemplo, necessária qualquer correcção granulométrica, mas se o betume estiver muito envelhecido, será impossível adicionar betume novo (muito mais mole) em quantidade suficiente, sem que se fique com um teor de betume excessivo.

Para uma melhor visualização das diferenças entre as 3 técnicas apresentam-se as seqüências das suas fases principais no esquema da Fig. 12.

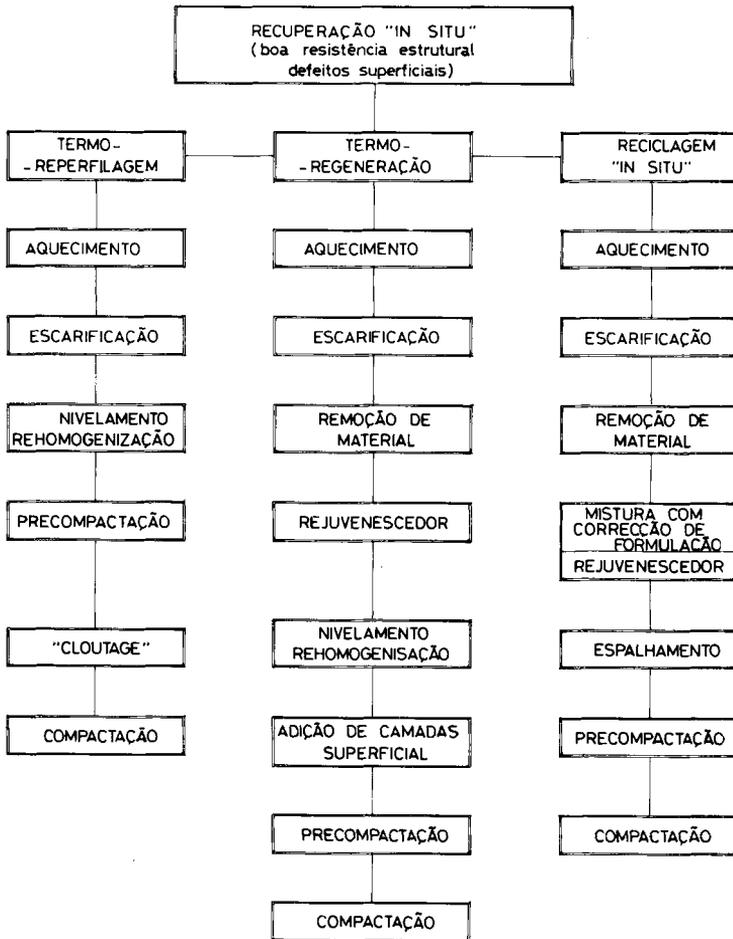


Fig. 12 — Técnicas de recuperação "in situ".

5 — RECICLAGEM EM CENTRAL

5.1 — *Generalidades*

A reciclagem em central retoma a ideia da correcção da formulação das misturas antigas, já seguida na reciclagem *in situ*, com a diferença de a correcção não ser feita no local da obra, mas sim numa central, que tanto pode já ter sido construída para esse efeito, como pode ser uma central convencional devidamente adaptada.

As vantagens desta técnica, em relação à da reciclagem *in situ* são: dissociar a origem das misturas a reciclar do destino das misturas recicladas e maior flexibilidade na correcção da formulação das misturas a reciclar.

As misturas betuminosas a reciclar em central tanto podem ser provenientes de operações de fresagem, de aplanamento ou de termogeração, como podem ser provenientes de outros tipos de trabalhos nomeadamente, abertura de trincheiras, demolições e reparações locais.

Como em todas as técnicas de reutilização de subprodutos ou dejectos levantam-se os problemas da remoção, transporte e colocação em depósito destes materiais.

A decisão de se proceder a uma reciclagem em central só deve ser tomada após a execução de estudos técnicos e económicos. Estudos técnicos, para verificar a possibilidade de reutilização dos materiais de que se dispõe e estudos económicos para se avaliar a rentabilidade do processo em comparação com as outras soluções tecnicamente equivalentes, tendo em conta, não só as economias devidas à reutilização de agregados e betumes, mas também, os custos da remoção dos materiais (fresagem ou aplanamento com posterior desgregação), os custos do seu transporte e a amortização dos equipamentos (modificação da central).

Embora estes estudos possam ser dissociados, há, sempre, que fazer uma síntese global dos mesmos, pois de nada serviria concluir que é economicamente rentável reciclar a uma taxa de 60%, se os estudos técnicos indicam que a taxa de reciclagem máxima admissível é de 50%.

No esquema da Fig. 13, indica-se a sequência das diferentes operações, que constituem a reciclagem em central. Como se pode observar, a remoção dos materiais do pavimento antigo até pode ser feita com «ripper», o que é usual nas demolições. Esta solução apresenta porém inconvenientes, por originar grandes blocos de mistura betuminosa, que têm de ser posteriormente britados, e por aparecerem muitas vezes agregados grossos das bases, agarrados aos blocos da mistura betuminosa.

A reciclagem de uma mistura betuminosa tem de passar pelo seu aquecimento, para a levar a uma temperatura, que permita a formação de uma mistura reciclada homogénea e o seu subsequente espalhamento e compactação.

Este aquecimento não pode ser feito no interior de um tambor de secagem convencional, visto tal solução conduzir a uma degradação da película de betume que

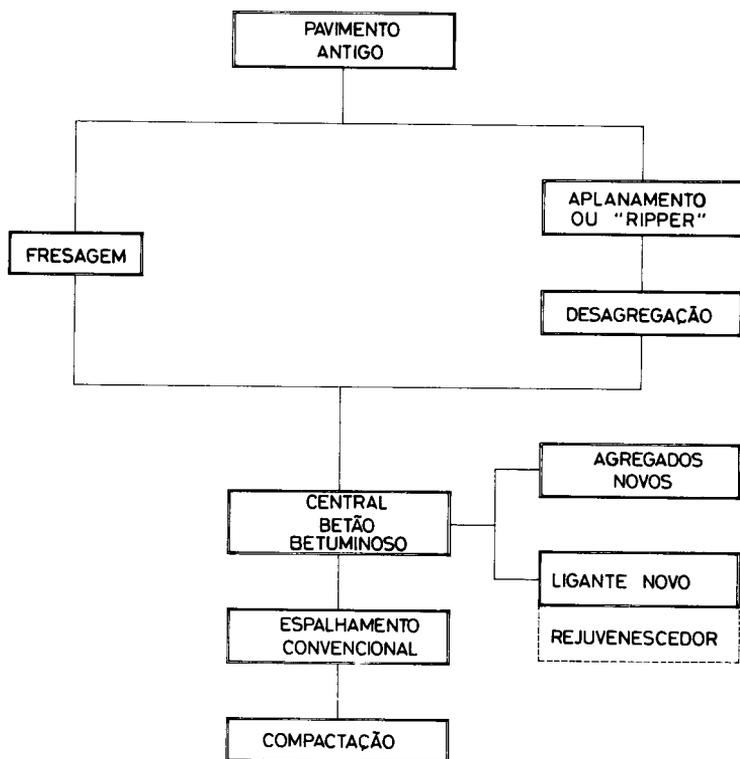


Fig. 13 — *Reciclagem em central.*

envolve os agregados, que se traduz no mínimo, pelo aparecimento de fumos azulados. O aquecimento só pode, então, ser feito por troca de calor com os agregados novos. Para que tal seja possível tem de se aquecer os agregados novos a uma temperatura superior à habitual, produzindo-se as trocas de calor entre os agregados sobre-aquecidos e a mistura a reciclar na báscula de pesagem e no misturador, podendo ainda continuar as mesmas trocas durante a carga e o transporte da mistura reciclada. Devido a este problema a taxa de reciclagem nas centrais convencionais adaptadas não pode ser muito elevada, a não ser com o sobre-aquecimento dos agregados novos verdadeiramente excessivo, o que levantaria uma série de problemas na central. Face a estes condicionamentos surgiu então, naturalmente, a ideia de utilizar na reciclagem as centrais munidas de tambor secador-misturador. Para que esta solução fosse possível, houve que estudar, cuidadosamente, a localização do ponto de introdução do material a reciclar e as modificações inerentes, a introduzir na central.

5.2 — Estudos técnicos e económicos

Os estudos técnicos preliminares, que se devem efectuar, têm os seguintes objectivos: determinar a taxa de reciclagem, determinar a natureza do ligante novo e o seu teor, determinar a natureza e a granulometria dos agregados novos.

O primeiro passo destes estudos, consiste na identificação completa do material a reciclar. Tal identificação passa pela obtenção prévia de amostras representativas desse material. As amostras podem ser obtidas por carotagem dos pavimentos a recuperar, de onde irá ser extraído o material, ou, directamente dos depósitos de material, já do antecedente constituídos com vista à reciclagem. No primeiro caso, deve-se prever um número e uma distribuição de carotes tal, que permita determinar a variabilidade do material e subdividir o pavimento em zonas homogêneas, que serão individualizadas durante a remoção do material, e a sua colocação em depósito. No segundo caso, ainda se pode tentar determinar a variabilidade do material, mas já é, em geral, demasiado tarde para constituir lotes homogêneos.

Em ambos os casos o objectivo é determinar a granulometria dos agregados e o teor e características do ligante envelhecido (penetração, ponto de amolecimento anel-bola, teor de asfaltenos, etc.). Quando se faz a carotagem é necessário ter em atenção a evolução da granulometria com o processo de recuperação do material. No caso de recuperação por fresagem a frio, a percentagem de finos aumenta sempre de algumas unidades. Para se ter uma ideia desta evolução tanto se pode recorrer aos resultados obtidos em fresagens anteriormente executadas, como se pode fazer a fresagem de um troço experimental do pavimento.

Quando nos depósitos se dispõe de material sob a forma de blocos, que têm de ser britados antes da reciclagem, também se deve recorrer à experiência anterior, ou a ensaios preliminares, que permitam fixar as condições a respeitar na britagem.

O teor de betume é determinado por meio de um ensaio de extracção normal. A determinação das características do ligante envelhecido passa pela recuperação prévia do betume, da mistura solvente betume obtida no ensaio de extracção.

Na Fig. 14 apresenta-se esquematicamente, a composição de uma mistura reciclada. De acordo com a simbologia aí representada podem-se definir as seguintes grandezas:

$$\text{Taxa de reciclagem} = \frac{A}{A + B + C} = \alpha$$

$$\text{Teor de betume final} = \frac{A_b + C}{A_G + B} = b$$

$$\text{Relação betume novo/betume antigo} = \frac{C}{A_b} = \delta$$

Estas três grandezas são a síntese do problema da formulação de uma mistura reciclada.

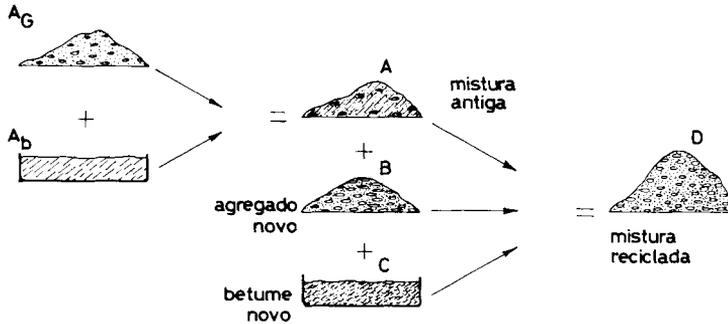


Fig. 14 — *Composição de uma mistura reciclada*

A taxa de reciclagem é importante sob o ponto de vista económico. O teor em betume final nunca pode ser muito diferente do de uma mistura clássica. A relação betume novo/betume antigo determinará, de acordo com as características do primeiro, a possibilidade de regenerar as características do segundo, o que se torna necessário em grande número de casos.

Se se designar por b_1 o teor de betume da mistura a reciclar, que é um dado do problema, verifica-se que o teor em betume final, a taxa de reciclagem e a relação betume novo/betume antigo, que representa a possibilidade de regeneração deste último, não são independentes e estão relacionados pela expressão:

$$b = \frac{\alpha b_1 (1 + \delta)}{1 + b_1 - \alpha b_1 (1 + \delta)}$$

ou ainda de uma forma aproximada pela expressão:

$$\alpha \approx \frac{b}{b_1} \frac{1}{1 + \delta}$$

Se os teores de betume da mistura a reciclar e da mistura reciclada são iguais ($b = b_1$), o que acontece com alguma frequência, a expressão anterior simplifica-se e transforma-se em:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \delta}$$

Tem-se então, a título de exemplo, as seguintes relações:

$$\delta = 0,5 \text{ origina } \alpha = 66\%$$

$$\delta = 1 \text{ origina } \alpha = 50\%$$

$$\delta = 2 \text{ origina } \alpha = 33\%$$

O ligante da mistura a reciclar sofreu, normalmente uma certa evolução: diminuição da penetração, aumento do ponto de amolecimento anel/bola, diminuição da susceptibilidade térmica, diminuição do teor em componentes aromáticos e aumento do teor em asfaltenos. Esta evolução, designada normalmente por envelhecimento do ligante, depende da sua idade, da sua posição na camada e da porosidade da mistura. O envelhecimento também pode ocorrer por aquecimento excessivo do ligante.

Devido ao envelhecimento o betume recuperado apresenta, em geral, as características de um betume duro e um elevado teor de asfaltenos. A sua regeneração obtém-se por mistura com um betume mole, com bom poder fluidificante, que lhe restitui a consistência de um betume novo. No caso de o envelhecimento ser muito acentuado, tem de se recorrer ainda a um rejuvenescedor do betume.

Uma primeira aproximação da solução do problema é dada pela seguinte expressão:

$$\log P = \gamma \log P_1 + (1 - \gamma) \log P_2$$

aplicável a um betume constituído por γ partes de betume envelhecido de penetração P_1 e $1-\gamma$ partes de betume novo de penetração P_2 . A relação betume novo/ betume antigo, anteriormente definida, será então:

$$\delta = \frac{1 - \gamma}{\gamma}$$

Se tivermos, por exemplo, um betume envelhecido de penetração 20 e se lhe adicionarmos 44% de betume novo de penetração 400 obter-se-á, admitindo-se que não há envelhecimento durante a mistura, um betume reciclado de penetração 50.

É pois possível determinar, a partir do conhecimento da penetração do betume envelhecido, a percentagem de ligante novo a adicionar, para obter uma dada consistência. Dadas as limitações impostas pela taxa de reciclagem, há casos em que se terá de procurar um outro ligante novo.

Em obra obtém-se, em regra, uma penetração inferior à calculada, devido ao envelhecimento durante a mistura.

A correcção da granulometria da mistura a reciclar é estudada tomando em consideração a sua curva granulométrica e a curva granulométrica pretendida para a mistura reciclada. As possibilidades da correcção granulométrica estão condicionadas pela taxa de reciclagem admissível, que, como foi referido, depende da possibilidade de regeneração do ligante.

Depois de se terem efectuado os estudos da correcção da formulação da mistura a reciclar, deve-se simular, em laboratório a operação de reciclagem. Os ensaios mecânicos utilizados para os estudos de formulação clássicos das misturas betuminosas permitirão proceder aos ajustamentos da composição das misturas recicladas. A interpretação dos resultados dos ensaios é análoga à dos estudos clássicos. No caso de se utilizar um rejuvenescedor, deve-se efectuar um ensaio de regeneração do ligante extraído das misturas a reciclar.

A rentabilidade económica da reciclagem em central deve ser avaliada por comparação com soluções tecnicamente equivalentes e que assegurem ao pavimento igual duração de vida útil. Tal comparação pode-se fazer através dos preços por metro quadrado de pavimento recuperado, ou da tonelada, se as quantidades consumidas pelas diversas soluções forem iguais.

As diferenças de custos da tonelada dependem, fundamentalmente, dos custos dos materiais postos no estaleiro, visto que os custos do fabrico e colocação em obra das misturas são iguais nas várias hipóteses. Há ainda que considerar a amortização dos custos de adaptação da central.

Em regra os pontos determinantes da rentabilidade económica da reciclagem em central são os custos de recuperação dos materiais (fresagem) e o custo do transporte de materiais recuperados. Quanto mais baixos forem estes custos e quanto mais elevados forem os custos dos materiais novos, maiores serão os benefícios económicos da reciclagem.

5.3 — Centrais de reciclagem

O objectivo da reciclagem em central é a obtenção de uma mistura igual à estudada em laboratório, devendo a passagem dos materiais pela central originar uma mistura o mais homogénea possível. O problema consiste, pois, em associar o mais intimamente possível, numa mistura de recuperação, os agregados recobertos por um

betume endurecido, provenientes, em geral, de uma fresagem a frio, com agregados e betumes novos. Nesta associação é necessário transferir para a mistura de recuperação uma quantidade de calor tal, que dê ao betume velho uma fluidez que lhe permita misturar-se com o betume novo e participar no envolvimento da massa formada por agregados novos + agregados de recuperação. Neste processo há que evitar um aquecimento excessivo, tanto do betume velho, como do novo.

No quadro dos objectivos e dos condicionamentos citados há dois tipos de soluções, consoante se utilizam centrais descontinuas clássicas ou centais com tambor secador-misturador.

5.3.1. — Centrais descontinuas clássicas

Nas centrais descontinuas a secagem e a mistura efectuam-se em órgãos diferentes, aproveitando-se esta descontinuidade para a introdução das misturas a reciclar. A energia térmica necessária ao aquecimento da mistura a reciclar é fornecida pelos agregados novos sobreaquecidos no secador. Esta transferência de calor faz-se, essencialmente, na pesagem e no misturador.

Em geral, a modificação que se introduz na central para a reciclagem consiste na adição de uma tremonha só para a mistura a reciclar, de onde ela segue directamente para a pesagem. No topo desta tremonha deve-se montar uma rede que retenha todo o material de dimensão superior a 2'', visto que os bocados de mistura que ultrapassam esta dimensão dificilmente são desagregados no misturador.

Na Fig. 15 apresenta-se esquematicamente este tipo de central modificada.

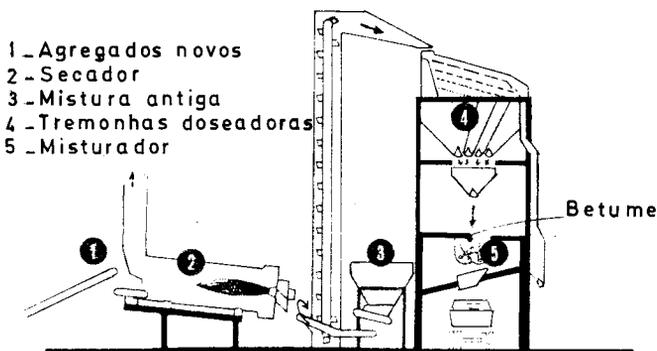


Fig. 15 — Reciclagem em centrais descontinuas clássicas.

5.3.2. — Centrais com tambor secador-misturador

A diferença fundamental destas centrais em relação às anteriores consiste no facto de a mistura entre os materiais recuperados e os materiais novos ser feita na presença de uma chama. Os agregados novos são introduzidos na parte superior do tambor, junto da chama. Eles absorvem a maior parte do calor do queimador e actuam com um escudo de protecção da mistura a reciclar, do ligante novo e do agente rejuvenescedor. A mistura a reciclar é adicionada sensivelmente a meio do tambor, seguida do novo ligante e agente rejuvenescedor. A mistura final reciclada fica a uma temperatura que permite o seu posterior transporte, espalhamento e compactação em boas condições. Por vezes apresentam estas centrais problemas de poluição, que podem ser minimizados reduzindo a taxa de reciclagem.

Na Fig. 16 apresenta-se esquematicamente este tipo de central modificada.

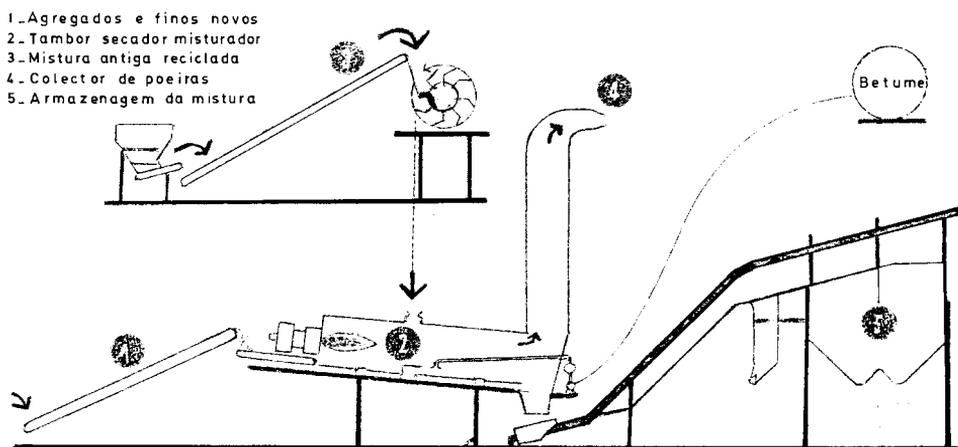


Fig.16 — Central com tambor-secador modificada para reciclagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIATION INTERNATIONALE PERMANENTE DES CONGRÉS DE LA ROUTE (1983) – *Rapport du Comité Technique des essais de matériaux routiers*. XVII Congrès Mondial de la Route. Australie.
- BAROUX Ret. al. (1982) – *Thermoregeneration, recyclage en place, recyclage en centrale*. Guide Pratique de Construction Routière n.º 41, 42, *Révue Générale des Routes et des Aerodromes* n.º 589, 590, Septembre, Octobre.
- AIR FORCE MANUAL 88-6 – *Standard Practice Manual for Pavement Recycling*. Chap. 6.
- BROWN E. R. (1981) – *Hot-mix recycling at Pope AFB*. New Mexico Paving Conference. January.
- BROWN E. R. – *Insuring quality in hot-mix recycling*. 61st Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- SAUTEREY R. (1982) – *Je recycle, tu recyclesrecyclent-ils?* *Révue Generale des Routes et des Aerodromes* n.º 584, Mars.
- BAROUX, R. (1983) – *Le recyclage des enrobés en centrale. Bilan après deux ans*. *Révue Generale des Routes et des Aerodromes* n.º 598, Juin.
- SAUTEREY R., CHAPPAT M. (1980) – *Les mots en "R" (rabotage, régénération, recyclage...) vont-ils remettre en cause la technique des enrobés bitumineux?* *Révue Generale des Routes et des Aerodromes* n.º 586, Octobre.
- BAROUX, R. et al. (1983) – *Les mots en "R" deux ans après*. *Révue Generale des Routes et des Aerodromes* n.º 594, Fevrier.
- RIVOIRE I. et al. – *La thermoregeneration sur pistes des Aerodromes*. *Révue Generale des Routes et des Aerodromes* n.º 604, Janvier.