



HAL
open science

Reciclagem de misturas asfálticas: Evolução após 20 anos e a situação atual na França

Yves Brosseaud

► **To cite this version:**

Yves Brosseaud. Reciclagem de misturas asfálticas: Evolução após 20 anos e a situação atual na França. 3° Salão de Inovação ABCR - 7° Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, Oct 2011, France. 17p. hal-00973444

HAL Id: hal-00973444

<https://hal.science/hal-00973444>

Submitted on 4 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RECICLAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS: EVOLUÇÃO APÓS 20 ANOS E A SITUAÇÃO ATUAL NA FRANÇA

Yves Brosseaud

Directeur de recherche à l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) - ex Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) – Nantes - France

RESUMO

Nos últimos dez anos, as preocupações ambientais levaram à busca por soluções técnicas que atendam a critérios de desenvolvimento sustentável. Na França, isto se concretizou na forma de recomendações do *Grenelle 2*¹ e da assinatura, em 2009, de uma convenção de compromisso voluntário das empresas de construção para reduzir o impacto ambiental de obras rodoviárias (reutilização de todos os resíduos provenientes do processo, redução dos gases de efeito estufa, economia de materiais não-renováveis, eco-calculadora, dentre outros). Para atender a essas expectativas, as misturas asfálticas de módulo elevado (EME) são, há mais de 20 anos, uma solução de alto desempenho para atender a questão da economia de material, aumentando significativamente a vida útil da estrutura. Por outro lado, a reciclagem a quente com grande quantidade de material fresado (> 50%) tem demonstrado sua eficácia em melhorar a "desempenho ambiental". Este artigo apresenta um resumo sobre a evolução ao longo de 20 a 30 anos da reciclagem a quente em usina de asfalto, trazendo um balanço da situação atual na França e comparando-a com a situação mundial (debatida por ocasião da PIARC 2010), e abordando o emprego de materiais asfálticos fresados nos maiores países europeus, além de Estados Unidos, Canadá e Japão. Este estudo apresenta as características mais importantes da combinação desses dois temas, ou seja, uma EME contendo 50 e 65% de material fresado. Os principais pontos discutidos englobam homogeneidade na origem dos materiais reciclados (camada asfáltica de revestimento), estudo preliminares de laboratório, novas plantas de usina contendo dois misturadores separados (um deles é específico para o aquecimento dos fresados e para controle de qualidade). A ideia central deste artigo é verificar o desempenho da mistura asfáltica, para efeito de comparação dentro do estudo preliminar e dos ensaios laboratoriais com misturas provenientes de usina para avaliação das propriedades mecânicas, como módulo complexo, resistência à fadiga e deformação permanente. Este estudo é complementado pela análise das propriedades do ligante, e em especial sobre as interações entre os ligantes antigo e novo nas misturas recicladas. Não foi utilizado agente rejuvenescedor, mas sim um asfalto duro. São apresentadas ainda as propriedades convencionais do ligante, além de propriedades reológicas e de composição física do asfalto. Por fim, este trabalho mostra um protocolo operacional que foi desenvolvido visando a fabricação de misturas recicladas em laboratório. Este estudo traz um avanço tecnológico importante, contribuindo para um melhor entendimento das misturas recicladas com grandes quantidades de material fresado.

ABSTRACT

Over the past decade, environmental concerns have led to the search of technical solutions that meet sustainable development criteria. In France, this was resulted in recommendations from Grenelle 2¹ and in a voluntary commitment convention among construction companies, in 2009, for reducing the environmental impact of roadworks (reuse of all waste from the process, reduce greenhouse gases, saving non-renewable materials, eco-calculator, ...). To meet these expectations, high modulus asphalt mixtures (EME) have been, for over than 20 years, a high performance solution to address aspects related to saving materials and significant increase in service life of the pavement structure. On the other hand, hot mix asphalt recycling using high percentages of reclaimed asphalt pavement (> 50%) has demonstrated effectiveness in improving the "environmental performance". This paper presents an overview about the evolution over 20 to 30 years of hot mix recycling in plant, making an assessment of the current situation in France and comparing it with the worldwide situation (discussed in PIARC 2010), and addressing the use of reclaimed asphalt pavement in the major European countries, as well as United States, Canada and Japan. This work presents the most important characteristics when combining these two subjects, i.e., an EME containing 50 and 65% of reclaimed asphalt pavement. The main topics discussed include homogeneity on the recycled material's source (asphalt wearing course), preliminar studies in laboratory, new mixing plants containing two separate mixers (one is specific for heating the reclaimed material and for quality control). The main idea of this paper is verifying the performance of the asphalt mix, for comparisons concerning the preliminary studies and the laboratory tests with asphalt mixes from the plant, in order to assess the mechanical properties, such as complex modulus, fatigue resistance and rutting. For complementing this study, analyses of the asphalt properties were carried out, especially about the interactions between the new and the old bitumen in the recycled mixes. Rejuvenator agent was not employed, but a hard

¹ Nota de tradução: O *Grenelle de l'environnement* é um projeto iniciado em 2007 que reúne diversos setores da sociedade, com o objetivo de de planejamento do projeto, enquanto o *Grenelle 2* trata da lei de compromisso nacional com o meio ambiente (Fontes: www.legrenelle-environnement.fr e www.developpement-durable.gouv.fr. Acesso em: 09 ago. 2011).

asphalt. Conventional properties of the bitumen are also presented, as well as rheological properties and physical composition of the asphalt. Finally, this work shows an operational protocol developed for producing the recycled mixes in laboratory. This study provides an important technological advance, contributing for a better knowledge of recycled mixes containing high percentages of reclaimed asphalt pavement.

1. INTRODUÇÃO

A reciclagem de materiais para pavimentação surgiu devido à necessidade de proteger o meio ambiente: economia de recursos naturais (agregados), espaços físicos (descargas), energia, redução dos gases de efeito estufa. Todos os materiais de pavimentação que são enviados aos locais de recebimento de rejeitos inertes são recicláveis, desde que não contenham alcatrão ou fibras de amianto (verificados a partir de alguns ensaios rápidos de caracterização capazes de detectar a presença destes elementos ou ainda de quantificá-los). Vale lembrar, que estes ensaios são realizados apenas em caso de suspeita, pois os mesmos representam custos adicionais e tempo de resposta.

Há uma grande quantidade de técnicas de reciclagem com material asfáltico fresado (RAP, do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*). Esta pode ser a quente (HMA, do inglês *Hot Mix Asphalt*), a frio ou morna (WMA, do inglês *Warm Mix Asphalt*), em usina ou *in loco* a frio (com ligante hidráulico, emulsão, espuma ou ainda mista), onde a escolha da técnica dependerá da natureza do material a ser reutilizado, do seu modo de tratamento (possíveis ofertas de material), e da destinação final do produto. O desenvolvimento da reciclagem é muito variável de um país para outro, e mesmo de uma região para outra. A reciclagem se desenvolveu mais rápido nas zonas francesas fortemente urbanizadas (Paris, Lyon e Lille), levando em consideração a distância das pedreiras de rochas maciças e a ausência de locais de descarga dos resíduos (Serfass, 2008). As rodovias, ou as vias interligadas, construídas com material reciclado têm apresentado uma boa homogeneidade, qualidade e controle eficaz da construção, demonstrando uma habilidade privilegiada de se utilizar misturas recicladas com elevados percentuais (40%), possibilitando um domínio da técnica de reciclagem.

Na França, o reaproveitamento e a reciclagem (a quente em usinas) tiveram início na metade dos anos 1970 e início dos anos 1980, respectivamente, logo após a primeira crise do petróleo. Em seguida, o desenvolvimento das técnicas foi mais lento, devido à abundância de pedreiras e de usinas de asfalto. A situação mudou nos anos 1990, com o surgimento de uma legislação mais severa (lei de 13 de julho de 1992, impedindo o descarte em aterros de materiais, a menos que esses de fato sejam resíduos “finais” – sem utilidade), com as recomendações da Diretoria de Vias sobre a necessidade da reciclagem sistemática a baixo custo, e depois em 2008 com a inclusão dos critérios ambientais propostos (*Grenelle de l'environnement*), então com a reciclagem. Atualmente, a reciclagem dos materiais de pavimentação é quase sistemática, mas sua valorização ainda não é grande.

O desenvolvimento da reciclagem em usina necessitou – e ainda requer – importantes investimentos por parte das empresas, para adaptar e complementar o material, desenvolver plataformas de estocagem para os materiais a serem reciclados, organizar os circuitos de coleta, estudar as dosagens, e colocar em prática os controles de qualidade adequados.

1.1. Alguns Números, Situação na Europa e Particularidades Francesas

Nos EUA, os materiais mais reciclados são as misturas asfálticas, com mais de 80 milhões de toneladas por ano. Isto representa, segundo Mike Acott, presidente da NAPA, aproximadamente duas vezes mais que o total dos quatro resíduos notadamente mais reciclados, que são papéis, vidros, plásticos e alumínio (40 milhões de toneladas por ano).

Tabela 1. Distribuição de toneladas anuais (em milhões de toneladas) na Europa, relativa à produção de misturas a quente, à disponibilidade de agregados fresados e sua utilização em novas misturas

HMA	Alemanha	França	Itália	Holanda	Outros	Total
	55	40	35	10	180	320
RAP disponível	14	7	12	5	12	50
RAP utilizado em HMA	11	3	2	3	2	25
Taxa de RAP utilizado (%)	80	42	17	70	17	50

Fonte: EAPA, 2010

Na Europa, a situação é muito variável, como indicado na Tabela 1. Na Alemanha e na Holanda, os princípios de reciclagem são considerados como um modo de vida há 20 anos, diferentemente dos países do sul da Europa (Itália, Espanha, Grécia etc.), que são muito menos preocupados com estas questões. Mas os tempos mudaram por conta dos aspectos ambientais.

Na França, a quantidade de misturas asfálticas produzidas anualmente oscila entre 38 e 43 milhões de toneladas. A cada ano, em torno de 6 a 7 milhões de toneladas são retiradas dos pavimentos, seja por meio de fresagem ou de desconstrução. Pesquisas realizadas em 2007 e em 2010 mostraram que houve um aumento significativo da proporção de misturas asfálticas antigas recuperadas e recicladas que foram empregadas em novas misturas a quente, passando de 23 para 42% em apenas três anos. Isto reflete a vontade de todos os atores envolvidos no âmbito rodoviário (gestores, empresas e centros de pesquisa), que se engajaram voluntariamente na reciclagem. As misturas asfálticas antigas que restam (58% em 2010) são utilizadas tanto em aterros, quanto em bases ou acostamentos de vias. Há poucas áreas para disposição final, já que a lei sobre descarte de resíduos determina que somente aqueles de fato sem utilidade é que podem ser descartados (como mencionado anteriormente). O objetivo fixado conjuntamente entre a administração e as empresas rodoviárias, no que diz respeito a uma convenção nacional de engajamento voluntário, é de que a taxa de reciclagem a quente seja de 60%, a partir de 2012. Com isto, parece que tal objetivo será alcançado de maneira relativamente rápida.

Observação: A norma francesa relativa à terminologia de misturas asfálticas (NF P 98-149), definiu o nome de “agregados de misturas asfálticas” aos materiais provenientes de fresagem, trituração de placas (utilizadas em testes), excessos ou resíduos oriundos do processo de produção. Os termos “recicláveis” e “reciclados” também são empregados.

2. MEDIDAS QUE FAVORECEM O DESENVOLVIMENTO DA RECICLAGEM

Foi constatado, depois do início dos anos 2000, o surgimento de um novo interesse relativo à reutilização dos materiais em geral, em particular das misturas asfálticas na reciclagem a quente em usina. O reaproveitamento *in loco* a quente (termoregeneração ou termoreciclagem) foi abandonado, principalmente em rodovias, por razões de segurança (emissões de fumos pela chama de aquecimento a gás, sobretudo em caso de chuvas passageiras), por questões ambientais e por grande consumo energético (já que requer de 3 a 5 máquinas de preaquecimento), além de baixo rendimento (velocidade de trabalho de 1 a 2 metros/minuto).

Muitos incentivos foram dados para favorecer e aumentar a reciclagem, dos quais se podem citar os seguintes:

i. Circulares e Notas emitidas pela Diretoria de Vias

Não existe um texto regulamentar a respeito da reciclagem de misturas asfálticas, somente Circulares ou Notas do Diretor de Estradas recomendando ou impondo o emprego de reciclagem de misturas asfálticas antigas na Rede Nacional de Estradas (RRN, do francês *Réseau Routier National*).

- Desde o ano 2000, as pesquisas realizadas pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) têm concluído que a utilização de 10% de reciclados em uma mistura asfáltica com 5 a 7 cm como camada de revestimento ou de *binder*, ou de 15% de reciclados em uma mistura asfáltica destinada a uma camada de base do pavimento com 8 a 12 cm (*grave bitume*² 0/14 ou 0/20), não modifica significativamente as propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Além disso, uma Nota de 03/10/2000, a respeito da gestão dos agregados no âmbito da RNN, menciona que “*Para os concretos asfálticos destinados a um tráfego inferior ou igual a T1 (300 a 750 caminhões/dia/sentido) ou para os concretos asfálticos delgados destinados a um tráfego inferior ou igual a T3 (50 a 150 caminhões/dia/sentido), não existem limitações técnicas para a reutilização de material asfáltico fresado, dentro de limite de 10%, não havendo a necessidade de se efetuar um novo estudo preliminar, ...*” (Serfass, 2008; Monéron e Baudru, 2000). Estas disposições estão oficializadas na Circular Ministerial de 13/06/2011.
- Mais recentemente, dentro das medidas de proteção ambiental (tomadas pelo governo), designadas sob o termo “*Grenelle de l’environnement*”, o Ministério dos Transportes (MEDDTL) manteve as disposições a seguir (Nota de 09/02/2009) por meio da gestão da RNN.
 - Sistematizar a adição de pelo menos 10% de agregados de misturas asfálticas;
 - Prever a fresagem das camadas asfálticas antigas e elevar a reciclagem a 20%;
 - Integrar a importância da taxa de reciclagem, como um critério de pontuação, nas ofertas de mercado;
 - Valorizar as soluções que proporcionam a fresagem com reciclagem.

ii. Normas e Guias de aplicação

A norma europeia NF EN 13108-8 (março de 2006) substituiu a norma francesa existente (XP P 98-135) que contempla a caracterização dos agregados para definir a taxa de reciclagem, mantida como metodologia. Os agregados são caracterizados por uma série de ensaios relativos aos seus componentes e às suas composições, com as recomendações para a sua reutilização.

Os guias técnicos de 2007 e de 2009, do Comité francês para as técnicas de estradas (CFTR) « Utilização de normas de misturas asfálticas a quente » (CFTR, 2004) e o guia LPC de dosagem de misturas asfálticas a quente [5 – recentemente publicado em versão em espanhol] especificam o emprego possível de agregados na dosagem de misturas novas, de acordo com a natureza da camada e da taxa de reciclagem

² Nota de tradução: O uso de bases de misturas asfálticas a quente com teor de asfalto muito baixo é bastante empregado na França, em camadas espessas como substituição de bases tratadas com cimento. Esse é o conceito da mistura denominada *grave bitume* – GB (base asfáltica) codificada em 1972, que se caracteriza pelo uso de aproximadamente 3,5% de asfalto de penetração nas faixas 40/50 ou 60/70, graduação contínua e elevada proporção de agregado britado (Fonte: Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 3ª reimp., 2010).

aconselhada em função das propriedades dos agregados e ligantes antigos, e de suas regularidades, definidos de acordo com as categorias (Tabela 2).

Tabela 2. Uso de agregado fresado (ou mistura asfáltica antiga a reciclar)

Uso no pavimento	Camada de rolamento		0 %	10 %	30 %	10 %	40 %
	Camada de ligação (Binder)		10 %	20 %	30 %	40 %	
	Camada de base						
Componentes do agregado de mistura asfáltica	Ligante asfáltico	Teor	TL _{NS}	TL ₂	TL ₁		
		Penetração ou TBA	B _{NS}	B ₂	B ₁		
	Agregados	Granulometria	G _{NS}	G ₂	G ₁		
		Características intrínsecas	R _{NS}		R ₁	R _{NS}	R ₁

NOTA: Se o teor de ligante médio do agregado de mistura é superior a 5%, considera-se que a mistura asfáltica é um concreto betuminoso onde os agregados foram selecionados de acordo com os critérios mínimos semelhantes aos que são procurados para o material.

- NS: não especificado, ou dispersão superior às diferentes classes seguintes.
- Exemplo: TL1, 2: dispersão sobre o teor de ligante < 1%, < 2% -

Os percentuais de agregados indicados na Tabela 2 podem ser aumentados sujeitos a uma caracterização precisa ou a um controle das origens dos mesmos, garantindo a homogeneidade e o respeito às especificações, conforme observado nas autopistas, onde as taxas podem atingir até 65 a 70%. Então, é indispensável considerar a representatividade das amostras, assim como, a homogeneidade dos agregados na definição da taxa, da quantidade disponível, da capacidade da planta de reciclagem, conservando um fluxo compatível com a natureza das obras.

iii. Convenção de acordo voluntário

Uma convenção de acordo voluntário – envolvendo as diversas partes interessadas na concepção, realização e manutenção da infraestrutura viária, rodovias e espaço público urbano – foi assinada entre o governo e os sindicatos de empresas do ramo de construção civil e *obras públicas* (em francês, *Bâtiments et Travaux Publics*, conhecido pela sigla BTP) de 25 de março de 2009. Esta convenção focaliza 10 compromissos, dentre eles a preservação dos recursos não renováveis, a redução de gases do efeito estufa e do consumo de energia. Os objetivos precisos foram fixados:

- A reciclagem de 100% das estradas, fazendo aumentar o percentual de reciclagem em usinas de asfalto de 25% (em 2009) para 60% (em 2012). A título de comparação, o objetivo europeu é ultrapassar o limite de 70% de reciclagem no horizonte de 2020.
- A redução da consumação de energia e das emissões dos gases do efeito estufa (objetivo de 33% no horizonte de 2020), esta passa notadamente para a otimização da função de transportes e redução da temperatura das misturas asfálticas (desenvolvimento de misturas asfálticas mornas).

Uma avaliação inicial foi preparada em maio de 2011, sobre a aplicação desta convenção, pelo instituto IDRRIM (*Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité*), reagrupando a administração e empresas. Apareceu um forte aumento da fresagem, da reciclagem e do emprego de técnicas de misturas asfálticas mornas, testemunhando um

progresso contínuo no sentido dos objetivos fixados. Além disso, as taxas médias de reciclagem passaram, entre 2008 e 2010, de 5,0 a 9,4% para as rodovias nacionais e de 5,0 a 7,3% para o conjunto das rodovias.

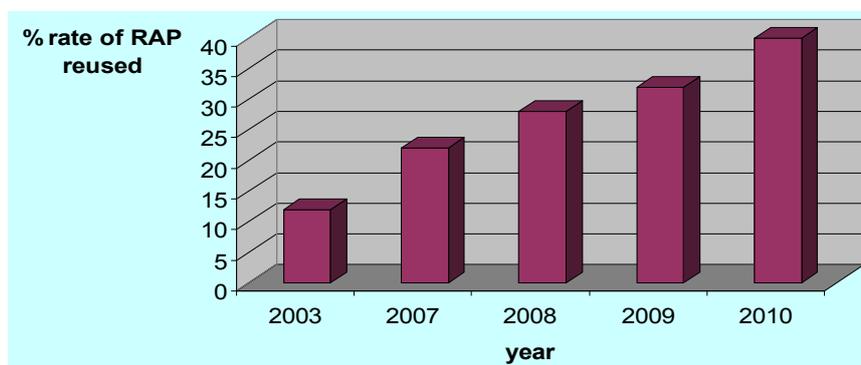


Figura 1. Evolução do uso de RAP nas misturas a quente, na França (Fonte : IDRRIM 2011)

iv. **Ajudas destinadas à promoção de novas técnicas eco-ambientais: os programas eco-ambientais SEVE e ECORCE**

O *Système d'Évaluation des Variantes Environnementales* (SEVE) é um eco-comparador comum às empresas de obras públicas. O objetivo deste programa é permitir ao cliente de comparar, com objetividade, de um ponto de vista estritamente ambiental e sob a base de um documento tipo, as ofertas das variantes das empresas com relação à solução de base. SEVE é simples, eficaz, rápido e evolutivo. Somente quatro indicadores são calculados:

- As emissões de gases do efeito estufa (em tonelada equivalente de CO₂);
- A consumação energética (em Megajoule);
- A consumação de agregados (em toneladas);
- A valorização da fresagem de materiais asfálticos (em toneladas).

A *Eco Compareur Routes Construction Entretien* (ECORCE), desenvolvida pelo LCPC em 2009, tem por objetivo fornecer os indicadores ambientais para as diferentes escolhas técnicas de construção e de manutenção estrutural das estradas, seguindo a metodologia de análise de ciclo de vida (do francês *Analyse de Cycle de Vie* – ACV). Esta ferramenta é mais especialmente destinada aos cientistas e aos centros de estudos e de pesquisas para os cálculos dos indicadores da pressão exercida sobre o ambiente global, ou local.

v. **Especificações de misturas asfálticas recicladas**

Não há especificações particulares para as misturas asfálticas a quente com agregados. Qualquer que seja a taxa de reciclagem, o produto final terá o mesmo desempenho daquele de uma mistura nova (ver as normas europeias e os avanços no cenário francês: NF EN 13 108-1, 2, 7).

vi. **Ações de pesquisa e de desenvolvimento das empresas e o governo, grupos de trabalho europeus, trechos experimentais (carta de inovação)**

As numerosas ações de pesquisa, como também a difusão de conhecimentos, estão atualmente caminhando para uma melhor compreensão dos mecanismos mobilizados nas técnicas de reciclagem, das possibilidades de reciclagem múltiplas, das interações entre o ligante antigo e novo, a fim aumentar a reciclagem, reduzindo os riscos de falhas, e aumentando a durabilidade dos pavimentos (Sites Direct mat, Reroad, projet LCPC Optimirr et Clean).

3. ESTUDOS PRELIMINARES E MATERIAIS PARA RECICLAGEM A QUENTE

A técnica consiste em misturar em uma condição a quente as misturas asfálticas de recuperação (agregados ou reciclados) com os agregados virgens e um ligante asfáltico anidrido, que pode ser um regenerador e, às vezes, uma junção de aditivos. O uso de regenerador é pouco utilizado atualmente.

Dois situações de reciclagem são apresentadas:

- A reciclagem ligada a grandes operações de fresagem de autopistas, vias expressas, pistas aeronáuticas, permitindo dispor de uma boa homogeneidade dos agregados, conduzindo a taxas de reciclagem em níveis elevados: de 30 a 50%, ou ainda 65%. Um estudo em laboratório é efetuado antes de cada operação, a fim de avaliar o estado das misturas antigas, a taxa de reciclagem, o tipo e a dosagem do ligante adicionado; e de verificar que o desempenho mecânico da mistura final é adequado e condizente com de misturas novas da mesma categoria.
- A reciclagem « corrente » no domínio da operação normal em uma usina de asfalto, utilizando os agregados de diferentes origens (fresados de pequenos trechos, desconstruções, sobretudo em centrais), provavelmente reconicionados (triar, re-homogeneizar, britar, fracionar (muitas vezes de 10 à 20 mm de acordo com o uso final), e protegido da água. Com estas estocagens das misturas de origens diversas, a amostragem representativa para estabelecer uma caracterização e a dispersão das suas características é possível. As taxas de reciclagem são sempre fracas (10 a 15%, excepcionalmente 20% se fraca humidade em centrais adaptadas). Então, não existe estudos específicos de reciclagem e há uma limitação a seguir as características básicas do RAP.

De maneira empírica, levando-se em consideração os tipos de centrais, a terminologia padrão distingue três taxas de reciclagem:

- Fraca: $\leq 10\%$ (a mais frequente na França, sobre as centrais periféricas)
- Média: 10 a 25% (para os materiais das camadas de base)
- Forte: $\geq 25\%$ de reciclados (caso da fresagem de vias importantes)

Considerando-se as limitações técnicas e econômicas, as fortes taxas são principalmente entre 40 e 60%. Algumas operações de reciclagem a taxas ainda mais elevadas foram realizadas, a título de experiência ou de operação, chegando até 100%. É de conhecimento geral que a reciclagem a níveis elevados (50 a 70%) são viáveis somente com um estoque de misturas asfálticas recuperadas bem homogêneas e perfeitamente identificadas. Faltando tecnologia de ponta, elas são destinadas a permanecerem excepcionais, exceto em relação a autopistas e estradas de mesmas características. Os materiais fresados com cuidado, camada por camada, são de procedência única (muitas vezes do próprio trecho). Eles são geralmente reutilizados rapidamente, tal e qual, sem precisar de fragmentação suplementar (um simples fracionamento é suficiente).

A presença de compostos com alcatrão (ou de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos - HAP), ou de fibras de amianto são proibidas por regulamentações europeias e francesas. E também, em caso de dúvidas, os ensaios são efetuados, antes de todos os estudos de reciclagem. Esses ensaios de caracterização rápida sobre a presença dessas substâncias e de suas quantidades são disponíveis, mas ainda são pouco realizados. Em caso de presença de contaminantes, os materiais são enviados às instalações de armazenamento de resíduos inertes (AIPCR, 2003).

O princípio de base é que a mistura asfáltica reciclada com agregados devem satisfazer às mesmas especificações que a mistura nova, sendo preconizados no mesmo local. Os estudos preliminares de formulação são semelhantes aos das misturas novas. As disposições são feitas para o aquecimento dos agregados e os tempos de mistura. Dependendo, é possível se questionar sobre a capacidade a reproduzir em laboratório, uma vez que a fase de preparação (tempo de secagem, aquecimento, estocagem) e de fabricação (tempo de mistura, energia) o que acontece na usina de asfalto, dada a grande variabilidade dos materiais e dos meios de produção (central com tambores separados, duplo tambor, tambor contra corrente).

Para a reciclagem forte, a verificação de uma boa homogeneidade de agregados disponíveis é essencial e necessita de diversos controles. A regeneração do ligante envelhecido se tornou um critério essencial (Bonnot, 1980). A escolha do teor de ligante acrescentado (ligante de viscosidade adaptada ou ligante especial regenerado) é fundamental para a durabilidade do pavimento. Na prática, é possível, em primeira aproximação, de calcular as características teóricas do ligante final pela lei das misturas (Bonnot, 1980), com relação à penetração, a temperatura do anel e bola, e a viscosidade (utilizados nos países frios com os ligantes moles). Estes cálculos parecem fornecer resultados satisfatórios para os ligantes puros, com envelhecimento normal, e então as diferenças reduzem entre o novo e o velho ligante. Por outro lado, eles são muitas vezes explorados, uma vez que:

- O ligante dos agregados é anormalmente duro (por exemplo, uma penetração mínima de 15 1/10mm);
- A diferença de consistência entre o ligante velho e o novo é muito importante (por exemplo, a diferença de TBA > 15 à 20°C ou diferença de penetração > 40 1/10mm; para os ligantes utilizados na França: grau de 20/30 à 50/70 para as misturas asfálticas);
- Os ligantes são modificados por polímeros.

Além disso, estas fórmulas são geralmente utilizadas supondo que a mistura entre o ligante do fresado e o ligante novo será homogêneo. Esta hipótese parece questionável tendo em vista as diferenças de níveis de envelhecimento entre os dois ligantes misturados. Assim, os problemas de compatibilidade /homogeneidade entre os dois ligantes podem aparecer e, dessa forma, ter um impacto significativo sobre as características funcionais da mistura final e sua durabilidade (resistência à fadiga, durabilidade, rigidez, resistência à deformação e à fissuração etc.) (Bicheron e Migliori, 1986).

A reciclagem implica em aquecer os agregados sem superaquecer o ligante e de dosá-los precisamente na mistura final. Tem que dispor de usinas adaptadas e contendo adaptações para a reciclagem. Quatro métodos principais de introdução são utilizados: introdução na base do elevador a quente, no misturador, por um anel de reciclagem no tambor secador (protegido da chama), para os materiais novos nos tambores de correntes paralelas, pela posição da zona de introdução de introdução para os tambores de contracorrente e pela secagem separada em um segundo secador específico para os agregados. É necessário aumentar o ciclo de fabricação, para alcançar uma boa homogeneidade entre o ligante antigo e o novo. A Tabela 4 apresenta a ordem de grandeza das taxas de reciclagem de acordo com os tipos e dispositivos da usina utilizada.

A França dispõe de numerosas centrais fixas, muitas vezes nas periferias, equipadas para fazer a reciclagem em pequenas taxas (em torno de 170 usinas), mas ainda não há o suficiente de usinas permanentes para realização de reciclagem média ou forte. Comparativamente aos dois

países mais avançados em nível de reciclagem de misturas asfálticas, a França ainda está longe de ter os equipamentos sistemáticos ou permanentes de fazer reciclagem a taxas médias ou fortes (Tabela 3).

Tabela 3. Capacidade de centrais de reciclagem na França, na Alemanha e nos Países Baixos

	França	Alemanha	Países Baixos
Total de centrais	440	670	44
Centrais equipadas para a reciclagem	180	640	43
%	41	96	98
Centrais com tambores duplos*	≈ 10**	126	23
% de centrais com tambores duplos /centrais de reciclagem	6	20	53

* estas centrais permitem taxas maiores que 40%, estas são centrais de tambores separados ou tambores concêntricos (centrais do tipo ASTEC)

** centrais móveis para trechos de autopistas com taxas de reciclagem maiores que 50% mobiles pour les chantiers autoroutiers avec des taux de recyclés ≥ 50%

Na maioria das usinas equipadas para reciclagem (taxas fracas), a introdução dos agregados se faz na base do elevador a quente (sistema simples e de baixo custo). É necessário superaquecer os agregados virgens (acima de 250°C ou mesmo 300°C), para reaquecer por contato os agregados úmidos. Isto ocasiona elevado consumo de energia. Além disso, este superaquecimento pode degradar superficialmente certos tipos de agregados (produção de ultrafinos na superfície). O rendimento da central é rapidamente limitado pela humidade excessiva dos agregados e a vaporização no elevador a quente. A taxa de reciclagem máxima é de 10% com os agregados secos. Dificilmente se pode ultrapassar 5% se eles estão úmidos.

Tabela 4. Taxa de reciclagem máxima de acordo com as usinas de asfalto

Dispositivos de secagem e de introdução	Reciclagens muito úmidas	Reciclagem secas
Base do elevador a quente	5 à 10 %	15 %
Tapete lançador Secador padrão	10 %	25 %
Tapete lançador Secador longo	15 %	25 %
Secador largo ou Anel de reciclagem	20 %	35 %
Misturador com secador de agregados	10 %	20 %
Tabor secador + misturador	30 %	50 %
Tambour Sécheur Enrobeur équicourant	20 %	30 à 40 %
Tambour Sécheur Enrobeur conte courant	25 à 30 %	50 %
Tambor duplo (« duplo barril »)	35 %	60 %
Dois tambores separados		65 à 75 %

As usinas de asfalto contínuas modernas são, na sua quase totalidade, do tipo “Tambor-Secador-Usinagem” (TSE). As usinas móveis são praticamente todas do tipo TSE. São diferenciadas em duas famílias TSE, de acordo com o gás de secagem e a corrente de materiais seguem o mesmo sentido (centrais equicorrentes ou de correntes paralelas) ou o inverso, se fala em centrais de contra-corrente (ou retrofluxo). Os agregados são introduzidos por um anel de reciclagem posicionados um pouco mais distante do meio do tubo. Eles são automaticamente protegidos da chama de aquecimento. Eles são, em seguida,

misturados aos agregados virgens paralelamente superaquecidos na parte à montante do tambor.

A empresa tem mais de 10 anos, de uma central ASTEC DB de tambor duplo, que a permite de reciclar as misturas asfálticas drenantes em uma nova mistura drenante, à uma taxa de 50% (proveniente RAFTED), e à uma capacidade de 300t/h, para uma umidade de 3% de agregados. Esta importante capacidade é coerente com as expectativas dos gestores de rodovias que desejam renovar as camadas de rolamento drenantes, utilizadas superficialmente pelo tráfico. O duplo barril (construtor US) é constituído de um cilindro fíco concêntrico com aquele, aonde chegam os agregados virgens superaquecidos e são introduzidos os materiais reciclados, o ligante e o filer adicionado. A parte ao redor é munida de braços com paletas que efetuam uma mistura vigorosa.

As últimas gerações de usinas permitem elevadas taxas de reciclagem e altas capacidades. Assim, depois de 2 a 3 anos, para satisfazer a demanda das pistas experimentais, as empresas se equiparam de algumas centrais móveis (em torno de uma dezena de unidades) de uma capacidade importante de 300 a 400 t/h, munidas de dois tambores para realizar as reciclagens à taxas elevadas. As misturas a reciclar são secas e preaquecidas até cerca de 120°C em um tambor paralelo funcionando como um TSE equi-corrente e enviados ao misturador. Paralelamente, os agregados virgens são superaquecidos à temperatura razoável (200°C) em um tambor secador à contra-corrente (clássico). Depois da dosagem, eles são enviados ao misturador e homogeneizados com o reciclado e com o ligante novo adicionado. Neste tipo de instalação, as taxas de reciclagem são em torno de 40 a 70% (com agregados secos).



Figura 2. Central de mistura asfáltica com dois tambores separados modelo Benninghoven (campo de reciclagem a taxas elevadas em um EME em autopista no norte da França)

4. BALANÇO, TENDÊNCIAS E EVOLUÇÕES ATUAIS: FORTES TAXAS, RECICLAGEM MORNA

Foi em 1981 que foi a experimentada em grande escala a reciclagem em elevadas taxas sobre as rodovias importantes submetidas a tráfego elevado (RN e autoestradas). Depois de um recuo de uma dezena de anos, sobre 6 a 7 locais de reciclagem em taxas elevadas (40 a 60%), pode-se chegar com evidência às principais conclusões a seguir [8, 9, 10]:

- Necessidade de adaptação das configurações das fresadoras, principalmente a velocidade (atenção às interfaces descoladas, onde a velocidade deve ser fortemente limitada para evitar a formação de plaquetas), para dispor os agregados sem aglomerações notórias, Recusar à 25mm<10%, e não muito úmido (alvo <2 a 3%).
- A mistura a quente deve ser feita suficientemente longa para uma “migração” do ligante antigo.

- O fenômeno de dupla usinagem é observado uma vez que o contraste de consistência entre os ligantes antigo e novo é muito marcante (diferença de penetração maior que 100), requerendo um reparo completo da mistura asfáltica reciclada a 60%, devido à formação de trilha de roda muito forte (caso de autopistas A2-20 000t).
- Uma usina TSE com anel de reciclagem emite emissões gasosas importantes, capazes de causar efeitos negativos ao ambiente (de onde as modificações dos sistemas atuais: tambor retro-fluxo, queimador ao centro de tambor, alongamento dos tubos, ...)
- O fenômeno de « caldo » no interior do tambor da mistura asfáltica, ligado à forte umidade dos agregados, e à uma pulverização de água, conduzem à misturas muito trabalháveis (teor de vazios de 2 a 3% mais fracos que as mesmas misturas a quente), necessitando reduzir as temperaturas de 20°C. Estas foram, então, as primeiras misturas asfálticas mornas fabricadas, sem que se possa ter o controle do processo.
- Depois de um recuo de 5 anos, foi notado, no conjunto uma boa eficácia de regeneração, à condição de limitar suas taxas, e para os ligantes antigos não muito duros (à época, o ligante de base era mais mole, na ordem de uma à duas classes com relação às práticas atuais). As funções de fluxo e de regeneração dos ligantes adicionados pareciam corretas para garantir uma “vida normal” (Bicheron e Migliori, 1986),
- A importância dos estudos de laboratório nos ligantes e, principalmente, no uso da GPC em gel para a caracterização físico-química dos ligantes (o novo adicionado e o final)
- A necessidade de dispor de um guia para facilitar a escolha e o bom uso desta técnica de reciclagem (CFTR, 2004).

Após estes experimentos, houve um longo período (1985 a 2000) sem que fossem realizados novamente trechos importantes, com as taxas significativamente elevadas (à exceção de reciclagem de misturas asfálticas drenante, mencionadas no parágrafo anterior). Depois, no início dos anos 2000, e principalmente nos seus últimos 5 anos, com a aceleração das preocupações ambientais, tudo foi justificado, constatou-se uma clara tendência para a solução mais sistemática no sentido da reciclagem de misturas asfálticas, tanto em baixos percentuais de 10 a 15% em usinas periféricas (misturas de recuperação múltipla, fresadas e peneiradas), quanto os trechos autopistas em elevados percentuais (ver o exemplo apresentado a seguir).

O uso de bases de misturas asfálticas a quente com teor de asfalto muito baixo é bastante empregado na França, em camadas espessas como substituição de bases tratadas com cimento (Bernucci *et al.*, 2007). Tais misturas são conhecidas como *enrobés d'assises*, (mistura asfáltica de base). Todos os tipos de *enrobés assises* (*Grave Betume – GB* e *Enrobé à Module Élevé – EME*) e de camadas de rolamento mais espessas (7 cm), tais como o concreto betuminoso semi-graduado (BBSG) ou concreto betuminosos a módulo elevado (BBME) o mais fino (2 cm de espessura) o concreto betuminosos muito fino (BBTM), passando pelas fórmulas de concreto betuminoso fino e das misturas asfálticas drenantes (BBD_r) têm sido objetos de reciclagem. Os ligantes reciclados foram principalmente os ligantes puros de grau semi-rígido (geralmente de 35/50, 50/70), ou mole (grau 70/10), mas igualmente os ligantes modificados por polímeros (SBS, EVA, borracha moída, no caso de BBD_r sobre autopista A1). Não houve ainda reciclagem de EME antigo, com um ligante originalmente duro (Péné, 10/20, TBA > 65°C), porque esta técnica de base e de reforço, envelhecida de 20 a 25 anos, apresenta um ótimo comportamento e não tem ainda necessidade de manutenção estrutural. Pode-se questionar sobre a capacidade de regeneração de um ligante tão duro.

Por outro lado, percebem-se numerosas aplicações, tendo um bom comportamento, de misturas de módulo elevado (EME) em camadas de base, fabricadas a partir de materiais reciclados de misturas asfálticas antigas de camadas de rolamento: misturas com 5 a 8 cm de espessura (BBSG), de misturas drenantes (BBD_r) ou de misturas muito esbeltas de 2cm de espessura (BBTM), dado o significativo endurecimento do seu ligante. Além disso, estas duas últimas técnicas representam mais de 60% dos revestimentos de autopistas, constituindo um recurso de qualidade importante. Nesse caso, é adicionado somente o ligante puro de grau 10/20 ou 15/20, ou até 20/30, para alcançar as propriedades mecânicas desejadas de uma EME (módulo complexo ou secante à 15°C, 10Hz > 14 000 MPa, resistência à fadiga $\epsilon_6 > 130$ microdeformações)

De uma maneira geral, o declínio significativo que está disponível nos permite de afirmar que, no que diz respeito às recomendações anteriores, a reciclagem a quente em usinas produziram as misturas asfálticas em todos os pontos conforme as especificações aplicáveis à mistura asfáltica nova correspondente. Quanto ao seu comportamento com o tempo, pode ser globalmente qualificado como satisfatório.

Recentemente, há mais ou menos 4 a 5 anos, muitas técnicas de misturas mornas (Brosseaud e Jacques, 2007) foram desenvolvidas, para atingir em 2010, perto de 1,5 milhões de toneladas. Esta técnica de misturas se entende no domínio da reciclagem. Os princípios ou procedimentos a seguir foram ensaiados em reciclagem morna:

- ligante adicionado « plastificado » para os aditivos químicos foram concentrados líquidos no ligante asfáltico (redução de temperatura de 30°C), foram sob forma de emulsão (temperaturas reduzidas de 40 a 45°C)
- Incorporação de zeólitas (alumino-silicatos hidratados liberando sua água uma vez que são aquecidos) na mistura (temperaturas reduzidas de 30°C)
- Aquecimento parcial da areia, ou umidificação e aditivos (temperatura muitas vezes inferior a 100°C)

A reciclagem morna de misturas asfálticas em camadas espessas (BBSG, BBME) e de base (GB e mesmo EME) foi experimentada com as taxas extremamente variáveis de acordo com os processos e tipos de centrais. Além disso, as BBME mornas foram recicladas a taxas de 20 e 50% e das GB mornas foram recicladas a taxas de 10, 20 ou até 30%. As EME mornas puderam ser fabricadas a taxas de 50 e mesmo de 65% com os resultados (dispersão da produção e aplicação) bastante satisfatórios. Estas fortes reciclagens foram obtidas com as centrais da nova geração, com tambor secador separado para os agregados.

Ainda não há disponibilidade de dados e de respostas suficientes. Entretanto, pode-se dizer que os primeiros resultados destes procedimentos mornos são promissores. É esperado que a reciclagem morna de misturas asfálticas permita:

- Com relação à reciclagem a quente, diminuir o consumo de energia e a emissão de gases do efeito estufa;
- Com relação à reciclagem a frio, obter uma melhora na trabalhabilidade e uma difusão mais rápida do ligante adicionado ao ligante envelhecido

Investigações realizadas por :

- PIARC em 2010 recebeu 21 respostas dos países membros mais envolvidos na tecnologia de estradas e de reciclagem (EUA, Japão, Alemanha, Países Baixos, França, Brasil);

- A EAPA ou os grupos de trabalho de projetos europeus (Direct Mat) de 2005 a 2010, depois de uma quinzena de países, ajudaram a desenvolver:
 - As questões recorrentes dobram as dificuldades encontradas, como os problemas pontuais de defeitos nas propriedades mecânicas destas misturas recicladas (resistência à fadiga, formação de trilha de roda, trincas ou sensibilidade à ação da água), as interrogações sobre as múltiplas reciclagens, ou a validade dos estudos de laboratório para simular a reciclagem em fortes taxas, mas também para sugerir caminhos a serem seguidos pela pesquisa:
 - Sobre a adaptação necessária dos métodos de formulação, a validação das leis de misturas e a proposição de novas aproximações, a simulação e a caracterização do envelhecimento dos ligantes asfálticos, a importância e o papel dos aditivos ou dos rejuvenescedores.

De uma maneira geral, a reciclagem é muito difundida no mundo, mas com uma grande variabilidade (de 100.000t à mais de 60 milhões de toneladas), devido às condições locais (presença ou não de novas fontes de agregados e de ligante, legislação, regulamentação, recomendação, conhecimento, ou mais simplesmente o hábito ou não). As aplicações e a experiência adquiridas são algumas vezes de longas datas, como nos EUA, França ou na Alemanha, onde os primeiros remontam do início dos anos 70. Percebe-se, sistematicamente, um interesse renovado depois dos 5 a 10 últimos anos.

5. EXEMPLO DE TRECHO DE AUTOPISTA CONTENDO RECICLAGEM EM ELEVADOS PERCENTUAIS EM UMA EME: CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE E DO DESEMPENHO DA MISTURA ASFÁLTICA

O local de trabalho do pavimento foi data de 2008, sobre uma autopista ao norte da França, suportando um tráfego pesado muito importante (em torno de 1000 veículos pesados / sentido / dia). Uma operação de fresagem da camada de rolamento de BBSG foi necessária por razões técnicas. A forte demande de ligante duro 10/20 ou 15/25 para a fabricação das EME, técnica cada vez mais utilizada, tanto em pavimentos novos quanto em reforços, leva a algumas restrições na entrega do ligante, e então a necessidade de reduzir o seu consumo. A solução da reciclagem em percentuais elevados em uma autopista, para a fabricação de EME é então essencial.

Os estudos paralelos detalhados e as aplicações de EBE à 50% de reciclagem, no ano passado, além de uma nova usina de asfalto permitiram a construção deste trecho, de um EME reciclado a 65% de um antigo BBSG 0/10, fracionados na peneira 20mm.

O agregado adicionado é um calcário de fração granulométrica: 10/20mm, à razão de 35%. O ligante novo é um ligante curo de grau 10/20 (gama de penetrabilidade), totalmente tradicional para um EME, dosado somente 1,6%. Isto representa uma proporção total de 5,2% de ligante na mistura asfáltica após a reciclagem (dos quais 3,6% é proveniente da mistura asfáltica antiga).

A fabricação de misturas asfálticas em uma central Benninghoven com dois tambores separados por uma temperatura de saída das misturas de 170 a 175°C (temperatura dos agregados na saída 220 a 240°C), com uma capacidade de 350 t/h (Figura 1). Os controles de produção respeitaram as especificações de mercado e uma boa uniformidade como um todo.

Os ligantes foram caracterizados pelos ensaios tradicionais (penetrabilidade e TBA) e pelos indicadores de estado como o teor de asfaltenos (modo operativo LCPC) e os índices de carboxilas e de sulfóxidos, determinado por um método de infravermelho por transformada de

Fourier, desenvolvido pelo LCPC (método de ensaio disponível), estes índices constituintes indicam se há envelhecimento dos ligantes. Os resultados são reagrupados na Tabela 5.

Tabela 5. Características do ligante antigo, adicionado e misturado (extraído da mistura asfáltica reciclada)

	Recuperação do agregado BBSG antigo	Ligante 10/20 original	Ligante 10/20 após RTFOT	Recuperação da mistura após reciclagem em central
Penetração (1/10 mm)	22	13	9	14
Temperatura balando e anel TBA (°C)	62,5	64,8	68,6	67
% asfaltenos	16	13,6	14,4	17,2
Índice de Carbonila	4,5	0	0	4,6
Índice de Sulfóxidos	12	1,3	2,1	10,8

Percebe-se uma boa coerência de resultados, de acordo com as diferentes etapas de reciclagem, depois da recuperação do ligante antigo, passando pelo ligante novo adicionado após o RTFOT, até a recuperação do ligante da mistura asfáltica reciclada, fabricado em central e compactado em laboratório (antes da realização dos ensaios mecânicos). Este apresenta as propriedades de consistência (penetração e TBA) semelhante ao ligante 10/20 após ROFOT (simulação do envelhecimento durante a usinagem), mas um estado mais estruturado (teor de asfaltenos de 17%) e um grau de envelhecimento menor com relação ao ligante antigo. Estas características são todas normais para uma mistura EME. As repetições e os ensaios comparados nestes dois laboratórios confirmam a validação dos métodos e dos resultados obtidos.

As pesquisas complementares estão em andamento, para avaliar o comportamento reológico (módulo complexo DSR) e o estado molecular (frações SARA por GPC e Iantroskan) dos ligantes, e as condições de mistura dos ligantes antigos e envelhecidos, levando-se em conta as condições de temperatura e de tempo de mistura. Estes estudos permitirão melhor compreender os mecanismos de troca durante a reciclagem. Um artigo é previsto para o congresso Euraspalt Eurobitume na Ankara em 2011.

As misturas asfálticas foram estudadas de acordo com o método francês de dosagem de misturas (versão espanhola disponível no IFSTTAR), adaptando-se as condições de preparação dos agregados para considerar as temperaturas em campo. As temperaturas recomendadas na norma europeia são muito mais fáceis para assegurar um bom aquecimento dos agregados e dispor de uma mistura EME à boa temperatura. Os testes efetuados foram conduzidos nas seguintes condições:

- Agregados 20/20: 230°C durante 12h,
- Agregados (em caixa fechada): 120°C durante 2h30,
- Ligante novo 10/20: 185°C durante 4h,
- Ligante novo 10/20: 185°C durante 4h,

A fim de dispor de uma mistura asfáltica na saída do misturador (isolado e mantido a 180°C), à 150°C, temperatura permitida para preparar corretamente as placas para os ensaios.

Os resultados dos ensaios de formulação, de acordo com as diferentes modalidades estudadas (estudos preliminares, estudo de 2007 e 2008, mistura preparada em laboratório ou em campo) são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Estudo da formulação e desempenho de EME 0/20 classe 2 reciclado a 65%

Comparação dos estudos	Preliminar (Empresa)	Estudo 2007 (LCPC)	Estudo 2008 (LCPC)	Especificações (EME)
PCG (NF EN 12697-31)				
V10 (vides %)	11	-	14	
V120 (%)	1,8	-	3,8	
V200 (%)	1	-	2	< 6
Dano por Umidade Induzida (NF EN 12697-12)				
Duriez r/R %	90	-	95	> 75
Trilha de Roda (NF EN 12697-32)				
Trilha de Roda à 30000 ciclos (%)	5,9	-	3,1	< 7,5
% vides	3,8		4	3 à 6
Módulo (NF EN 12697-26)				
Tração 15°C 0,02s (MPa)	14 300	-	labo /	> 14 000
% Vazios	2	-	chantier**	3 à 6
Flexão 15°C 10hz (MPa)	-	17 000	17 000 / 17 550	> 14 000
Phi 15°C 10hz (degré)	-	11,3	11 / 10,4	
% Vazios	-	2,4	3,5 / 4,0	3 à 6
Fadiga em flexão (NF EN 12697-24)				
Condições de ensaio 10°C – 25 hz		120 / 129*	labo /	
ϵ_6 (microdeformação)		7 / 7,5	chantier**	
$\Delta\epsilon_6$ (microdeformação)		-0,192 / -	128 / 117	> 130
Pente de fadiga		0,149	4,7 / 14***	
% vazios		2,8 / 3,2	-0,187 / -	
E modulo 10°C – 25 hz		19 650 /	0,199	3 à 6
		20 850	1,1 / 2,5	
			21 300 / 19 580	

* repetição dos ensaios de fadiga variando a dimensão dos corpos de prova: base maior de 70mm em vez de 50mm (para manter a granulometria 0/20 da EME)

** comparação entre uma fabricação no campo em usina de asfalto e em laboratório (compactação de placas usando a mesma energia de compactação das placas em laboratório).

comparaison entre une fabrication sur chantier en centrale d'enrobage et en laboratoire (compactage des plaques selon la même énergie au compacteur de plaque de laboratoire)

*** elevada dispersão, porque o ensaio foi realizado em apenas 3 níveis de 4 amostras (no lugar de 6 amostras, nos casos correntes)

O balanço dos ensaios conduz às constatações a seguir:

- Uma EME reciclada a 65% está de acordo com todos os critérios de especificações da norma para uma EME de classe 2
- Conforme previsto, a ELE apresente uma ótima trabalhabilidade, uma excelente resistência à ação da água e uma muito boa resistência à formação de trilhas de roda;
- As características de módulo são elevadas, e bem típicas de um ligante duro e estruturado, apresentando um envelhecimento moderado;
- As repetições dos ensaios de módulo em flexão (módulo completo 15°C 10 hz e módulo antes do ensaio de fadiga 10°C 25 hz) são bem homogêneos, da ordem de grandeza de 17000 Mpa, satisfatório como valor de dimensionamento, sem que isto possa ter consequências muito negativas sobre o comportamento com relação à fadiga;

- A resistência à fadiga é limitada em comparação a especificação, uma vez que o valor médio ϵ_6 se situa em torno de 125 microdeformações, com uma dispersão normal, para uma taxa de reciclagem igualmente forte. Percebe-se uma dispersão anormalmente forte ($\Delta\epsilon_6$ de 14, sendo o dobro dos resultados clássicos) devido a apenas 12 corpos de prova testados, em vez de 18 no caso geral;
- Coloca-se em evidencia uma sensibilidade maior na dispersão dos ensaios de fadiga com as taxas de reciclagem elevadas.

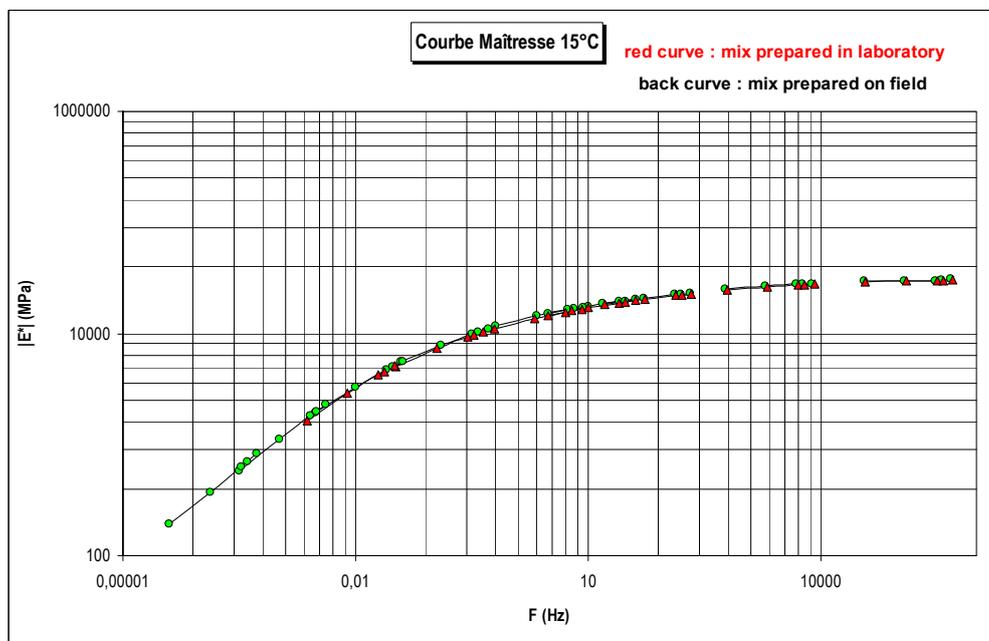


Figura 2. Comparação das curvas mestras do módulo a 15°C, de acordo com a fabricação em central e em laboratório

Os ensaios de caracterização das EME em campo, após um ano sob a ação do tráfego, conduzem a resultados de módulo e de fadiga bem comparáveis com os resultados dos ensaios de estudo em laboratório.

A reunião dos resultados, apresentados neste estudo, valida o método de ensaio, permitindo avaliar a magnitude das propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas, mesmo em taxas elevadas, e apresentado alto desempenho, como as EME.

6. CONCLUSÃO

Com o *Grenelle de l'Environnement* e os compromissos assumidos pela Europa com relação à redução de emissão de gases do efeito estufa, levou em consideração que o desenvolvimento durável tornou-se indispensável na maneira de planejar as infraestruturas de transportes. A valorização dos materiais da rodovia e para a rodovia, foi demonstrada a partir de diversas aplicações realizadas durante mais de 25 anos, autorizando uma melhor apreciação técnica, principalmente em termos de durabilidade, mas também sobre as condições desse êxito.

No entanto, permanece a necessidade de melhorar, por meio da pesquisa, as condições mais favoráveis para explorar as propriedades residuais das misturas asfálticas, principalmente uma se estas forem compostas de ligante asfáltico modificado por polímeros.

O objetivo da reciclagem ideal seria de poder reutilizar os materiais nas mesmas condições que no estado inicial, então a mesma camada, a taxas mais elevadas possíveis, compatíveis com as disponibilidades do material, sem comprometer a durabilidade da rodovia, sempre

conservando a simplicidade e a eficácia das misturas asfálticas, em um ambiente econômico e ambientalmente compatível. Se estas disposições forem aplicadas, uma taxa de economia de reciclagem de 10% sistemática para as centrais fixas nas periferias, reciclando as misturas asfálticas antigas fresadas e peneirando, e uma taxa de reciclagem elevada (50%) nos trechos de autopistas ou similares, permitiria a utilização total das misturas asfálticas antigas disponíveis, e preservaria os recursos naturais de maneira sustentável, reduzindo os transportes de matéria prima.

AGRADECIMENTOS

Em particular, o autor gostaria de agradecer à Rosangela Motta e à Liedi Bariani, pelo trabalho de tradução, interpretação destes dados técnicos e seu envolvimento com a organização, por me permitir de apresentar esta comunicação técnica, apesar do relevante atraso no envio deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIPCR, Comité Technique AIPCR C7/8 (2003), Chaussées Routières, Recyclage des chaussées - Guide pour le recyclage à chaud en centrale des enrobés bitumineux.
- Bicheron G., Brule B., Migliori F., LRPC Aix - BL 144 juillet-Août 1986 - Régénération des liants pour enrobés: Méthodologie d'étude en laboratoire: Exemple de quelques cas de chantiers
- Bicheron G., Migliori F. - Bl 144 juillet-Août 1986 EUROBITUME 85. - Effet du régénérant sur le vieux bitume au cours du recyclage à chaud. pp 95-99.
- CFTR – Guide technique: Retraitement des chaussées et recyclage des matériaux bitumineux de chaussées – CFTR , juillet 2004
- J. Bonnot (1980), Régénération et recyclage des enrobés bitumineux, Bulletin de Liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, 105, 79-108
- J. P. Serfass - Recyclage en centrale des matériaux de chaussées – technique de l'ingénieur – aout 2008 – C 5620 – <http://www.techniques-ingenieur.fr/page/c5620niv10001/recyclage-d-enrobes.html#notfound>
- LPC Bituminous mixture design guide - Manuel d'aide à la formulation des enrobés – Groupe de travail des LPC – ERLPC CR 39 A– sept 2007
- M. Chappat, J.F. Plaut – Le recyclage des enrobés en centrale : bilan après 1 an – Revue Générale des Routes et Autoroute – N° 584, mars 1982
- M. Huet, J.C. Poirier -. - Méthodologie d'étude en laboratoire des enrobés bitumineux de recyclage. - EUROBITUME 85 - Bulletin de Liaison des LPC – N° 144 juillet-Août 1986 pp 89-93.
- P. Monéron, M. Measson - Fabrication des graves-bitume avec un taux de recyclage de 15 %. - RGRA no 811, nov. 2002.
- P. Monéron, Y. Baudru, B. Guieysse, Q. Quaranta - La suppression des études préalables dans le cadre du recyclage des enrobés bitumineux à 10 %. - Revue générale des routes et aérodromes (RGRA), no 785, juin 2000.
- Y. Brosseau, M. Saint Jacques – will bituminous mixes be made differently tomorrow: state of the art for warm mix asphalt in France – PIARC 2007 – Paris sept 2007