

**Estudo sobre reabilitação de pavimentos flexíveis por
meio de técnicas de reciclagem**

Leonardo Augusto Curado

Relatório Final da Dissertação apresentado á
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Julho de 2019

Estudo sobre reabilitação de pavimentos flexíveis por meio de técnicas de reciclagem

Leonardo Augusto Curado

Relatório Final da Dissertação apresentado á
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

No âmbito da dupla diplomação com o
Centro universitário UniEvangélica

Orientador:

Manuel Joaquim da Costa Minhoto

Co-orientador:

Isa Lorena Silva Barbosa

A linguagem utilizada na dissertação foi o Português Brasileiro

Julho de 2019

AGRADECIMENTOS

Inicialmente gostaria de transmitir meus sinceros agradecimentos aos meus orientadores Doutor Manuel Joaquim da Costa Minhoto e Mestre Isa Lorena Silva Barbosa por todos os ensinamentos e dedicação que propiciaram o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos Otavio Conde e Rafael Palmeira por toda ajuda prestada para o desenvolvimento desta dissertação e também pelo companheirismo e amizade durante todo esse período.

Por último a minha família que ao longo desde tempo de ausência sempre me encorajaram e me transmitiram o devido incentivo para a conclusão desta tão importante etapa da minha vida, em especial, o meu muito obrigado aos meus pais por toda paciência, força e oportunidade que me proporcionaram.

RESUMO

As vias de comunicação e, em particular, a rede rodoviária consiste em uma infra-estrutura de extrema relevância para o desenvolvimento econômico de qualquer país, desta forma é necessário que a mesma mantenha um nível de qualidade e segurança de modo a garantir condições básicas para sua utilização.

Neste âmbito surge a necessidade da reabilitação de pavimentos degradados, sendo necessário a utilização de matérias e metodologias de construção que visem o melhor resultado com o menor impacto possível, sendo ele do ponto de vista econômico e também ambiental, sendo o segundo um quesito em forte crescimento o que acaba por exigir uma maior sensibilidade do projetista em relação as técnicas construtivas tradicionais.

Com isso, o presente trabalho pretende apresentar um estudo aprofundado sobre a reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis baseada em técnicas de reciclagem de pavimentos, tentando explicitar as principais fases do processo construtivo juntamente com a determinação das principais variáveis que influenciam na determinação da utilização deste tipo de técnica em ascendente crescimento na área da pavimentação.

Nesta dissertação também são apresentados os diferentes tipos de técnica de reciclagem de pavimentos flexíveis, detalhando suas características, materiais utilizados, vantagens e desvantagens e todas as etapas de um projeto de reabilitação de uma via degradada, culminando em uma reflexão sobre a viabilidade da utilização da reciclagem de pavimentos em um pavimento deteriorado.

PALAVRAS CHAVE

Reabilitação

Reciclagem

Pavimentos flexíveis

ABSTRACT

The lines of communication and, in particular, the road network consists of an infrastructure of extreme relevance for the economic development of any country, thus it is necessary to maintain a level of quality and safety in order to ensure basic conditions to your utilization.

In this context arises the need of rehabilitation of degraded floors, being necessary the use of materials and methods of construction aimed at the best result at the lowest possible impact, from an economic point of view and also environmental, the second a question in strong growth which turns out to require a greater sensitivity of the designer regarding the traditional construction techniques.

With that, the present paper seeks to present an in-depth study on the rehabilitation of flexible road pavements based on recycling techniques, trying to spell out the main stages of the construction process along with the determination of the main variables that influence the determination of the use of this type of technique in ascendant growth in the area of the flooring.

In this dissertation are also presented the different types of recycling technique of flexible pavements, detailing its characteristics, materials used, pros and cons and all stages of a rehabilitation project of a degraded pathway, Culminating in a reflection on The viability of the use of pavement recycling on deteriorated pavements.

KEY WORDS:

Rehabilitation

Recycling

Flexible pavement

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento geral.....	1
1.2. Enquadramento do trabalho.....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.4. Organização da tese.....	5
2. FUNCIONAMENTO E MODO DE DETERIORAÇÃO – PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	7
2.1. Patologias Recorrentes	9
2.1.1. Deformações	9
2.1.2. Fendilhamento	12
2.1.3. Desagregação da camada de desgaste	13
2.1.4. Movimento de materiais	15
2.1.5. Reparações	17
2.2. Causa e efeito das degradações	17
3. METODOLOGIAS DE OBSERVAÇÃO DOS PAVIMENTOS.....	20
3.1. Técnicas de avaliação e equipamentos	23
3.1.1. Avaliação da capacidade estrutural	24
3.1.2. Avaliação do estado superficial	25
3.1.3. Avaliação da irregularidade longitudinal	28
3.1.4. Avaliação da irregularidade transversal	30
3.1.5. Avaliação dos coeficientes de atrito no pavimento	31
3.2. Frequência da observação	33
3.3. Dados Auxiliares	35

4.	ETAPAS INICIAIS NO PROCESSO DE reabilitação	36
4.1.	Caracterização da via a reabilitar	37
4.2.	Caracterização dos materiais	39
4.2.1.	Agregados	41
4.2.2.	Aglutinantes	44
4.3.	Determinação da taxa de reciclagem	48
5.	AMBIENTES DE RECICLAGEM	50
5.1.	Reciclagem no local (In Situ)	52
5.2.	Reciclagem em usinas	56
5.2.1.	Centrais descontínuas	57
5.2.2.	Centrais contínuas	61
6.	TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS FLÉXIVEIS	65
6.1.	Reciclagem <i>In situ</i> a frio	66
6.1.1.	Reciclagem <i>In situ</i> a frio com espuma de betume	69
6.1.2.	Reciclagem <i>In situ</i> a frio com emulsão betuminosa	72
6.1.3.	Reciclagem <i>In situ</i> a frio com cimento	76
6.2.	Reciclagem <i>In situ</i> a quente	79
6.3.	Reciclagem em centrais a frio	81
6.4.	Reciclagem em centrais semi-quente	84
6.5.	Reciclagem em centrais a quente	85
7.	AVALIAÇÕES E RECOMENDAÇÕES DE UTILIZAÇÃO	88
7.1.	Tabelas de utilização – Técnicas de reciclagem	88
7.2.	Tabelas de vantagens e desvantagens – Tipos de ligantes	91
7.3.	Avaliação de desempenho das misturas recicladas	92
7.3.1.	Aplicação do software JPAV	95
7.4.	Avaliação econômica (Casos de estudo)	101

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
8.1. Considerações Gerais	106
8.2. Trabalhos Futuros	108
9. BIBLIOGRAFIA.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Modo de Funcionamento dos pavimentos.....	7
Figura 2.2 - Efeitos das deformações em pavimentos flexíveis.....	11
Figura 2.3 - Efeitos de Fendilhamento em pavimentos flexíveis.....	13
Figura 2.4 - Efeitos da desagregação da camada de desgaste.....	15
Figura 2.5 - Efeitos do movimento de materiais em pavimentos flexíveis.....	16
Figura 2.6 - Esquematização da sequência de evoluções das degradações.....	19
Figura 3.1 - Deflectómetro de impacto FWD.....	25
Figura 3.2 - Viga Benkleman.....	25
Figura 3.3 - Equipamento de observação via câmara fotográfica GERPHO.....	27
Figura 3.4 - Perfilómetro APL.....	29
Figura 3.5 - Bunb Intregador.....	30
Figura 3.6 - Equipamentos multifunções ARAN.....	31
Figura 3.7 - Pêndulo Britânico.....	32
Figura 3.8 - Equipamentos de continuo atrito SCRIM.....	33
Figura 4.1 - Evolução do estado de um pavimento.....	39
Figura 4.2 – Diferentes tipos de agregados.....	42
Figura 5.1 – Fluxo de tomada de decisões quando a técnica de reciclagem.....	52
Figura 5.2 - Reciclagem <i>In situ</i>	52
Figura 5.3 - Máquina recicladora a frio <i>In Situ</i>	55
Figura 5.4 - Central Móvel de reciclagem a quente <i>In Situ</i>	56

Figura 5.5 - Esquema de funcionamento de central betuminosa descontínua com incorporação de material fresado a frio.....	58
Figura 5.6 – Esquema de funcionamento de uma central betuminosa descontínua com incorporação do material fresado a quente.....	59
Figura 5.7 - Esquema de funcionamento de central betuminosa descontínua com incorporação de material fresado pelo método <i>Recyclelean</i>	60
Figura 5.8 – Esquema de funcionamento de central de torre com incorporação de material fresado a frio.....	61
Figura 5.9 - Esquema genérico de funcionamento de uma central betuminosa contínua.....	62
Figura 5.10 - Esquema do tambor secador misturador em central contínua de fluxos paralelos.....	62
Figura 5.11 - Esquema do tambor secador misturador de central contínua de tambor duplo.....	63
Figura 5.12 - Esquema do tambor secador misturador de central contínua de fluxos contracorrente.....	64
Figura 5.13 - Temperaturas observadas em centrais contínuas de fluxos contracorrente e de tambor duplo.....	64
Figura 6.1 - Tipos de reabilitações em pavimentos flexíveis.....	65
Figura 6.2 - Rotores de fresagem de pavimento.....	67
Figura 6.3 - Exemplo genérico de comboio de reciclagem <i>in situ</i> a frio.....	68
Figura 6.4 - Esquema da obtenção do betume-espuma.....	70
Figura 6.5 - Fases da reciclagem a frio <i>in situ</i> com betume-espuma.....	71
Figura 6.6 - Esquema da produção de mistura reciclada a frio <i>in situ</i> com betume-espuma.....	72
Figura 6.7 - Fases da reciclagem a frio <i>in situ</i> com emulsão betuminosa....	74

Figura 6.8 - Esquema de produção de mistura reciclada a frio <i>in situ</i> com emulsão betuminosa.....	75
Figura 6.9 - Processo de distribuição do cimento sobre o pavimento.....	76
Figura 6.10 - Fases da reciclagem a frio <i>in situ</i> com cimento em calda.....	78
Figura 6.11 - Equipamento aquecedor – Reciclagem <i>In situ</i> a quente.....	80
Figura 6.12 - Comboio de reciclagem <i>in situ</i> a quente.....	80
Figura 6.13 - Representação da Fresagem do pavimento.....	82
Figura 6.14 - Representação da reciclagem em central a frio.....	83
Figura 6.15 - Fases da reciclagem em central semi-quente.....	85
Figura 6.16 - Esquema do processo de reciclagem a quente em central.....	87
Figura 7.1 - Estrutura do pavimento (Situação modelo).....	95
Figura 7.2 - Interface do software JPAV.....	96
Figura 7.3 - Gráfico sobre vida útil das misturas recicladas <i>In situ</i> a frio com emulsão.....	97
Figura 7.4 - Gráfico sobre vida útil das misturas recicladas em central a quente.....	97
Figura 7.5 - Variação do Módulo (E) de acordo com a taxa de reciclagem e tipo de ligante.....	98
Figura 7.6 - Vida útil dos pavimentos com misturas recicladas.....	99
Figura 7.7 - Variação da vida útil de acordo com o CBR do solo fundação.....	100
Figura 7.8 - Estrutura do pavimento degradado caso 1.....	102
Figura 7.9 - Estrutura do pavimento degradado caso 2.....	102
Figura 7.10 - Comparação entre custos finais caso 1 e 2.....	105

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Classificação das patologias por deformações.....	10
Quadro 2.2 - Classificação das patologias por Fendilhamento.....	12
Quadro 2.3 - Classificação das patologias por desagregação da camada de desgaste....	14
Quadro 2.4 - Classificação das patologias por movimento dos materiais.....	15
Quadro 2.5 - Classificação das relações entre as degradações e os fatores de degradação.....	18
Quadro 3.1 - Frequência da observação.....	35
Quadro 4.1- Características dos agregados a reciclar.....	43
Quadro 4.2 - Frequência mínima dos ensaios a realizar sobre os materiais a reciclar....	44
Quadro 4.3 - Propriedades e exigências de conformidade do betume.....	46
Quadro 4.4 - Métodos de ensaio dos betumes asfálticos.....	46
Quadro 6.1- Características dos provetes em fase de formulação da mistura reciclada.....	78
Quadro 6.2 - Comparação de consumo de energia.....	81
Quadro 7.1 - Recomendações de uso Reciclagem in situ a frio.....	88
Quadro 7.2 - Recomendações de uso Reciclagem in situ a quente.....	89
Quadro 7.3 - Recomendações de uso Reciclagem em central a frio.....	89
Quadro 7.4 - Recomendações de uso Reciclagem em central a quente.....	90
Quadro 7.5 - Recomendações de uso Reciclagem em central semi-quente.....	90
Quadro 7.6 - Características dos ligantes.....	91
Quadro 7.7 - Módulo de deformabilidade de mistura reciclada in situ com emulsão....	93
Quadro 7.8 - Módulo de deformabilidade de mistura reciclada em central a quente.....	94

Quadro 7.9 - Solução Tradicional caso 1.....	103
Quadro 7.10 - Reciclagem em central a quente.....	103
Quadro 7.11 - Diferença entre custo de produção das soluções de reabilitação.....	103
Quadro 7.12 - Solução Tradicional caso 2.....	104
Quadro 7.13 - Reciclagem in situ a frio com emulsão.....	104
Quadro 7.14 - Diferença entre custo de produção das soluções de reabilitação.....	104

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento geral

Com o decorrer do tempo os pavimentos rodoviários sofrem grandes alterações referentes às suas características iniciais, quer sejam em questões superficiais como deterioração da camada de desgaste ou até os níveis de comprometimento estrutural da faixa de rodagem. Nesse âmbito se desenvolve a temática da manutenção e da reabilitação dos pavimentos, que surge de forma a garantir a segurança necessária para a utilização da via juntamente com a necessidade do menor investimento econômico, contemplando assim dois pilares básicos para o desenvolvimento de um pavimento de qualidade, que são as condicionantes econômicas e nível de serviço desejado.

Ao longo de sua vida os pavimentos rodoviários sofrem grandes solicitações, sendo elas em decorrência de ações climáticas ou por ações do tráfego, quer em termos de volume tráfego, quer em termos da sua agressividade. Tais solicitações se traduzem em degradações que afetam diretamente todos os usuários da mesma, pois *“As vias de comunicação e, em particular as redes rodoviárias, constituem a infra-estrutura fundamental para o desenvolvimento global de quaisquer pais.”* (PEREIRA & MIRANDA, 1999).

De acordo com o desgaste dos pavimentos frente ao tempo, surge a necessidade iminente de manutenção que se traduz no ato ou efeito de manter-se as características e exigências definidas em projetos iniciais de construção da via, implicando assim uma série de medidas para diminuir os efeitos nocivos das degradações ocorridas. Essas medidas consistem em manutenções periódicas que acarretam em um novo tipo de problema, a necessidade de matérias-primas.

Devido a necessidade de aumento de medidas preventivas e corretivas para assegurar o nível de serviço desejado, ocorre um crescimento de certa forma relevante do consumo de recursos para tais medidas, recursos esses que uma vez esgotadas, as reservas não podem ser regeneradas como é o caso dos produtos derivados de petróleo por conta do mesmo ser um produto não renovável e limitado.

Sendo assim, surge a necessidade de uma opção alternativa às técnicas de reabilitação convencionais, que são as técnicas de reciclagem de pavimento, técnicas essas que possibilitam a reutilização dos pavimentos degradados como fonte de matéria prima para medidas de reabilitação quer seja no pavimento degradado ou em novos pavimentos. As técnicas referidas anteriormente ditas como alternativas viáveis em relação a preservação do meio ambiente (DNIT, 2006), caminham junto com o conceito de sustentabilidade, que é um termo usado para definir ações e atividades humanas que visam suprir as necessidades atuais dos seres humanos, sem comprometer o futuro das próximas gerações. Em termos práticos a sustentabilidade está diretamente relacionada ao desenvolvimento econômico e material sem agredir o meio ambiente.

A reciclagem de pavimentos permite a reabilitação de características estruturais de pavimentos, além da possibilidade de melhorias do projeto em face de um aumento significativo no volume de tráfego, tal técnica deve sua origem nos Estados Unidos em meados da década de 70, a mesma foi desenvolvida com o intuito de ser uma medida alternativa as técnicas tradicionais, neste período houve um evento político que causou uma grande reviravolta no setor da pavimentação: a Crise do Petróleo. Neste período, o custo da produção de produtos à base de petróleo batia recordes de preço, surgindo também uma necessidade de medidas de proteção ao uso dos recursos naturais, pois a indústria da construção e de manutenção rodoviária desde aquele período já podiam ser consideradas as que mais consumiam agregados de elevada qualidade (AZEVEDO & CARDOSO, 2003), o que estimulou o desenvolvimento de técnicas construtivas de modo a solucionar esses problemas.

Com o passar dos anos, na década de 90, houve uma grande atenção voltada para essa técnica construtiva, novamente por questões de valor econômico, mas também e principalmente por este período se tratar do amadurecimento e desenvolvimento do tema sustentabilidade que viria se tornar o real direcionamento da aplicabilidade de técnicas que visam à melhor gestão de recursos e eficiência na execução dos projetos de pavimentação rodoviária.

Atualmente as técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis atuam como metodologias de intervenção com capacidade de aproveitar parte ou totalidade das matérias de composição da via degradada como matéria prima para o processo de

reabilitação da mesma, sendo uma solução para o desenvolvimento sustentável das vias de comunicação a nível internacional, garantindo níveis de eficiência satisfatórios, e sendo uma opção econômica totalmente relevante.

Sendo assim necessário se verificar a necessidade da melhor técnica dentre as várias existentes, de forma a garantir uma viabilidade econômica juntamente com a melhor solução para as patologias identificadas no pavimento rodoviário, justificando assim sua utilização que se baseia em eficiência, sustentabilidade e economia.

1.2. Enquadramento do trabalho

O desenvolvimento do presente trabalho de acordo com as necessidades citadas anteriormente, tem por objetivo a análise do processo de reciclagem de pavimentos flexíveis e os diferentes tipos de técnicas ligados a essa prática, de modo a explicitar as principais fases que interferem no processo ,que acabam por determinar ou não sua utilização, buscando assim demonstrar e direcionar a melhores práticas de utilização dentro a várias opções de técnicas de manutenção e reabilitação de pavimentos rodoviários por meio da reciclagem.

Técnicas construtivas de reabilitação, que se embasam inicialmente no conceito de sustentabilidade visam uma melhoria significativa para a sociedade em geral, porem as mesmas precisam de uma séria análise para a verificação e justificação de sua aplicabilidade. Com isso, o desenvolvimento da utilização de métodos sustentáveis tendem a se expandir de forma gradual, de acordo com o documento publicado pela EAPA (European Asphalt Pavement Association) intitulado “*Directivas ambientais sobre as melhores técnicas disponíveis para a produção de misturas betuminosas*” (Traduzido para Português pela APORBET , 1998), são apresentados suportes legislativos em relação a processos e tecnologias de redução do impacte ambiental, que sejam “razoáveis, econômicas e eficazes na prática”, onde também são apresentados planos de incentivos fiscais e econômicos reforçando o conceito de subsidiariedade em assuntos ambientais, tal medida ainda foi reforçada com o Ato Único Europeu por meio do tratado de Maastricht da União Europeia onde foi estabelecido medidas de preservação, proteção e melhoria da qualidade do meio ambiente.

Sendo assim o conceito sustentabilidade vem se tornando um tema amplamente discutido, e que ganha destaques a cada dia em todos os setores da engenharia, o que acabou por resultar em um vetor de direcionamento para a decisão da elaboração desta tese que resulta em um amplo estudo sobre a reciclagem de pavimentos flexíveis, desenvolvido de forma exaustiva tendo como referência grandes autores da área de pavimentação rodoviária, com o intuito de expor as várias questões a serem trabalhadas de forma a se obter uma resposta satisfatória junto aos projetos de reestruturação dos pavimentos degradados.

1.3. Objetivos

Durante o desenvolvimento e concepção deste estudo pretende-se explicitar informações sobre todas as fases que constituem os processos de reciclagem de pavimentos flexíveis, além da explanação do seu valor econômico e estratégico para o desenvolvimento sustentável de um país. Juntamente pretende se expor informações sobre a constituição e modo de funcionamento dos pavimentos flexíveis, análise das causas e efeitos das degradações dos pavimentos e as principais patologias que atuam sobre este tipo de pavimento rodoviário.

De forma intuitiva procura se detalhar também as principais metodologias de observação de pavimentos, e os processos construtivos preliminares de uma reabilitação, para além de uma exposição detalhada das várias técnicas e procedimentos de reciclagem de pavimentos, desenvolvendo uma reflexão em face de cada tipo de reciclagem de acordo com os processos de execução, equipamentos e imposições em nível de volume de tráfego da via e sua relevância estratégica, traduzindo em uma análise sobre o custo benefício da sua utilização.

Já em uma fase posterior é desenvolvido uma análise da vida residual do pavimento em relação a número de eixos-padrões admissíveis por meio da utilização da aplicação de análise estrutural de pavimentos JPAV, buscando comparar os resultados obtidos das técnicas mais utilizadas em Portugal na atualidade, onde em uma fase seguinte é apresentado um caso de estudo buscando em termos econômicos demonstrar os benefícios da reciclagem em relação a soluções tradicionais de reabilitação.

A resultante esperada desta investigação consiste em uma sistemática análise das várias características de um projeto de reabilitação, frente ao conjunto de variáveis determinadas de acordo com especificações do projetista, que visam determinar qual o melhor caminho ou decisão a ser seguido de modo a garantir o nível de serviço desejado com um menor grau de investimento financeiro e de tempo.

1.4. Organização da tese

O presente estudo é constituído por oito capítulos, cuja seguinte organização é apresentada de forma sintetizada nesta seção. Sendo o primeiro capítulo um capítulo introdutório, onde é desenvolvido um enquadramento geral sobre o tema definido a ser estudado e consequentemente a justificativa da escolha do tema com os principais objetivos a serem alcançados ao fim do referido trabalho de investigação.

O segundo capítulo “Funcionamento e modo de deterioração - Pavimentos flexíveis” trata sobre a composição e modo de comportamento do pavimento flexível face aos esforços solicitantes que atuam sobre o mesmo. Ainda neste capítulo são apresentadas as anomalias recorrentes que atuam sobre este tipo de pavimento, juntamente com a causa e efeitos destas degradações sobre a via.

Já o capítulo três, nomeado de “Metodologia de observação de pavimentos” desenvolve um estudo onde são demonstradas as principais técnicas de análise do estado de um pavimento existente, tratando sobre metodologias de observações, tipos de equipamentos utilizados e procedimentos a serem utilizados nesta fase de um projeto.

No capítulo quatro, “Processos construtivos preliminares” são apresentadas informações sobre os processos construtivos prévio de um projeto de reabilitação por meio das técnicas de reciclagem, onde são explicitadas informações sobre caracterização dos materiais (Ligantes e Agregados) de composição a serem reutilizados juntamente com a determinação de uma taxa de reciclagem adequada ao projeto.

O capítulo cinco denominado de “Ambientes de reciclagem” faz um detalhamento acerca dos possíveis locais onde possa ocorrer o processo de reabilitação por meio da reciclagem, expondo uma ampla caracterização dos tipos de centrais de

usinas que são utilizadas para a fabricação de misturas betuminosas recicladas e suas respectivas características.

Já o capítulo seis “Técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis” aborda as principais técnicas de reciclagem utilizadas na atualidade, demonstrando seus processos de execução, tipos de ligantes, equipamentos, e possíveis vantagens ou desvantagens ligadas a utilização de determinada técnica.

O sétimo capítulo deste estudo “Avaliações e recomendações de uso” desenvolve uma série de informações com o foco de um pré-direcionamento sobre a utilização de determinada metodologia de reciclagem, fazendo uma análise de vantagens e desvantagens, recomendações de uso de acordo com determinada degradação e informações sobre o tipo de ligante a ser utilizado. Em uma fase posterior é desenvolvida uma comparação mecânica entre as técnicas mais usuais em Portugal, juntamente com a apresentação de casos de estudos, desenvolvendo uma comparação de ordem financeira entre soluções tradicionais de reabilitação e soluções por meio da reciclagem.

Por fim, no Capítulo oito “Considerações Finais” são apresentadas as principais conclusões acerca do estudo realizado, juntamente com os possíveis desenvolvimentos futuros no âmbito da utilização das técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis.

2. FUNCIONAMENTO E MODO DE DETERIORAÇÃO – PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Um dos principais motivos para a pavimentação rodoviária é de oferecer condições mínimas nas faixas de rolamento de modo a permitir a circulação dos usuários com segurança, comodidade e menor custo de operação. Desta forma, para se tratar das possíveis reabilitações que irão ocorrer durante o período útil de um pavimento, inicialmente deve se conhecer o seu real modo de funcionamento e as causas e efeitos das suas degradações.

Antes mesmo da abertura ao tráfego um pavimento flexível já está sob ações que levam à sua deterioração, os agentes climáticos por sua vez exercem grande influência sobre a durabilidade de uma via, variando de acordo com a composição do pavimento e localidade onde se encontra, sendo que somado com os esforços derivados do tráfego juntamente com materiais deficientes ou até mesmo problemas ligados a execução da obra, acabam por catalisar o efeito de degradação da via. De acordo com a (Figura 2.1) fica representado o esquema básico de funcionamento de um pavimento flexível, onde fica claramente evidenciado que as principais variações que levam a danificação da faixa de rolamento são as ações relacionadas ao comportamento mecânico dos materiais, ações climáticas e ações do tráfego.

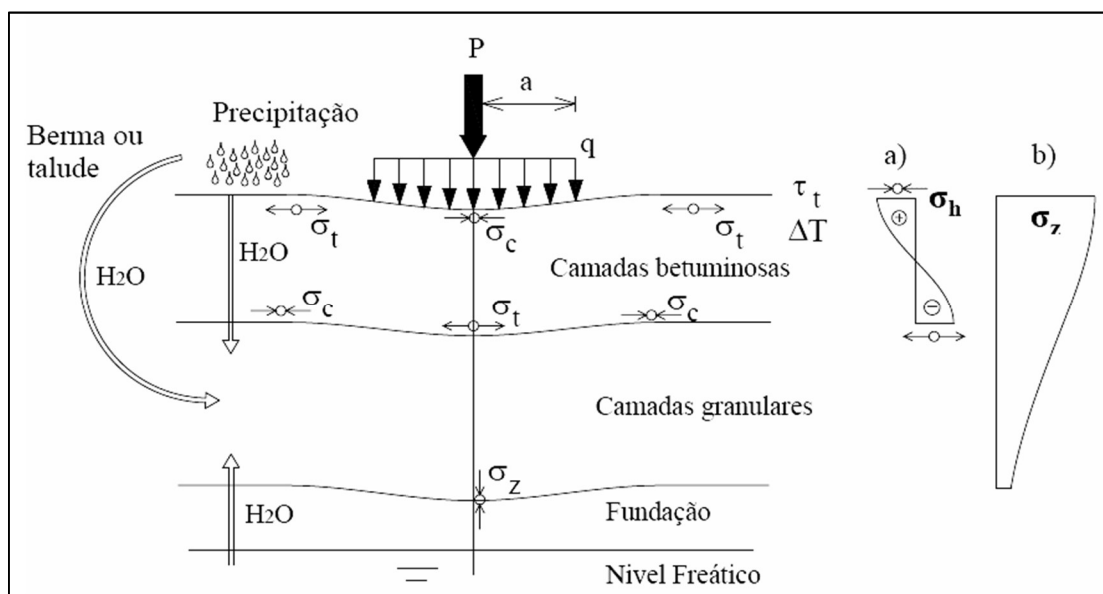


Figura 2.1 - Modo de Funcionamento dos pavimentos - (PEREIRA & MIRANDA, 1999)

Quanto à caracterização dos materiais, pode-se considerar de modo geral que na composição de pavimentos rodoviários flexíveis, em sua grande maioria são divididos em dois grupos, elementos estabilizados mecanicamente através da sobreposição dos mesmos e elementos estabilizados por meio de aglutinantes betuminosos. A principal diferença que justifica a utilização de elementos diferentes no mesmo pavimento é devido a seus modos de comportamentos complementares face aos esforços solicitantes do pavimento, gerando assim com essa combinação uma redução considerável da espessura do pavimento que se irá construir ou reabilitar.

A grande diferença de comportamento dos elementos que compõem as camadas do pavimento se dá pela capacidade dos materiais betuminosos resistirem a esforços de tração, conseqüentemente os demais elementos são utilizados principalmente para esforços de compressão, o que resulta em um sistema simples de funcionamento, mas que devido à diversidade de variáveis envolvidas, como ações de temperaturas, capacidade de carga do solo ou até mesmo a presença de água na via devido a precipitações entre outras, acabam por tornar o projeto da via um pouco mais trabalhoso, sendo necessário uma análise mais ampla do seu real desempenho.

As ações relacionadas ao tráfego se traduzem de certa forma em uma carga distribuída aplicada diretamente sobre o pavimento, sendo caracterizado segundo (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008) “*por uma pressão vertical (considerada uniforme e aplicada numa área circular) e por uma ação tangencial aplicada no plano entre pneu e pavimento*”. Já os fatores ligados a ações climáticas, são definidos como ações relacionadas à temperatura e sobre o contato do pavimento com águas derivadas de precipitações, sendo que devem ser avaliados seus impactos dentro e fora das camadas que compõem o pavimento.

Devido a existência de vários fatores que condicionam o tempo de utilização de um pavimento, definir um determinado prazo de funcionamento se torna algo de extrema complexidade, pois o processo de degradação de um pavimento ocorre por meio de ciclos, onde determinadas solicitações sobre a via acabam por exigir um comportamento dos materiais, alterando assim suas características iniciais, e que futuramente serão alteradas novamente devido a novos esforços existentes sobre o pavimento. As constantes alterações das propriedades dos elementos construtivos

acabam por fragilizar os mesmos ou por vezes alterar seu modo de funcionamento, onde a falta do devido funcionamento de um material pode acarretar no início do ciclo de degradações que irão ocorrer sobre o pavimento.

De acordo com o funcionamento da degradação de um pavimento pode se afirmar que a deterioração da via está diretamente ligada aos agentes de deterioração que atuaram antes da sua total inutilização, sendo essencialmente esses danos ligados a dois fatores, fatores da via como elementos construtivos utilizados, qualidade dos materiais e da execução da obra e dimensões das camadas do pavimento, juntamente com fatores externos que já foram expostos, que essencialmente são as ações relacionadas às características climáticas e ações derivadas do volume de tráfego.

Neste âmbito pode se reforçar a relevância dos processos de reabilitação de um pavimento flexível, sendo que a sua atuação deve ocorrer no início da apresentação de defeitos da via, pois fica claro que a existência de uma degradação acaba por interferir no surgimento de outra, devido à relação de mudança de esforços e de propriedades dos materiais. Por isso é imprescindível um prévio conhecimento das patologias que atuam sobre os pavimentos flexíveis, e juntamente uma prévia análise das suas causas e os efeitos de sua existência, algo que será tratado nos subcapítulos à frente.

2.1. Patologias Recorrentes

2.1.1. Deformações

No decorrer do tempo de utilização de um pavimento, a manifestação dos danos ocorre de forma gradual, sendo as deformações permanentes um fator de grande relevância para a deterioração do mesmo. A observação desta patologia dentro da análise de um pavimento é essencial, pois devido à relação de causa e efeito entre os danos existentes e de acordo com os materiais de composição da via, pode se afirmar que a existência deste dano em uma via acaba por dar origem a demais processos de degradação que atuam sobre o pavimento em questão. As ocorrências das deformações em um pavimento flexível podem ocorrer por meio de várias formas, sendo as principais classificadas de acordo com o quadro (Quadro 2.1) a seguir:

Deformações	Abatimento	Longitudinal
		Transversal
	Deformações Localizadas	
	Ondulações	
	Rodeiras	Grande Raio
		Pequeno Raio

Quadro 2.1 – Classificação das patologias por deformações
(Adaptado de PEREIRA E MIRANDA, 1999)

A deformação permanente por abatimento pode se traduzir como uma deformação com dimensões relevantes, e seu surgimento pode ocorrer por todo o segmento do pavimento, quer seja em seu segmento longitudinal ou transversal. Usualmente o surgimento de abatimentos longitudinais está relacionado com características dos materiais de composição das camadas, solos de fundação e sobre possíveis infiltrações de águas na estrutura da via, o que em termos mais simples, refletem na diminuição da capacidade estrutural de suporte do pavimento.

Sua ocorrência no sentido longitudinal, pode se manifestar de duas formas quer seja no decorrer da via próximo as bermas ou centralizado dentro das faixas de rolamento. Quando seu surgimento se dá próximo ao eixo das faixas, pode se associar a existência de um fendilhamento na mesma direção de ação do abatimento, o que provoca infiltrações de águas por várias camadas do pavimento, inclusive até as últimas camadas provocando uma redução no suporte total da via. Já quando o mesmo ocorre próximo as bermas, seu surgimento pode ser associado à fragilidade dos materiais granulares não ligados ou até mesmo a problemas relacionados ao solo de fundação, sendo que é essencial também se verificar uma possível infiltração de águas próximas as áreas laterais do pavimento, o que também poderia explicar o surgimento desta deformação. A projeção transversal do abatimento está também relacionada às deficiências citadas juntamente com a ação da água, e sua presença no pavimento está condicionada à localização das mesmas e seus raios de ação, sendo que as mesmas fragilidades ligadas ao solo e aos agregados juntamente com a presença de água podem influenciar o surgimento de deformações localizadas, onde a principal diferença entre os abatimentos se dá pelo fato do tamanho de sua extensão.

As deformações permanentes se manifestam também por meio de ondulações na direção transversal do pavimento. Sendo que as mesmas atuam sobre as camadas superiores, denominadas como camadas de desgaste e camadas superficiais. Sua ocorrência é devido à má distribuição dos aglutinantes betuminosos na via e ao excesso de deformação plástica derivada da ação do volume de tráfego e seus respectivos esforços, o que acaba por gerar ondulações brandas sobre a faixa de rolamento.

Já a mais relevante deformação em um pavimento flexível ocorre por meio das rodeiras, sendo classificadas em de grande e de pequenos raios, esta diferença está relacionada a influência das camadas em seu surgimento. As rodeiras de pequeno raio estão relacionadas às camadas superiores, devido a condicionantes climáticos e sobre elevado volume de tráfego, já as rodeiras de grande raio estão relacionadas às camadas inferiores, diretamente ligadas às deformações das fundações e dos elementos granulares e á influência devido às infiltrações que atuam sobre essas camadas. Esse tipo de deformação surge no segmento longitudinal do pavimento no local de frequente contato entre a roda do veículo e o pavimento, sua existência compromete a qualidade da via, e representa de acordo com o nível da deformação um sério problema estrutural da via, sendo imprescindível uma ação de reabilitação. De acordo com a figura a seguir (Figura 2.2) são explicitados os efeitos mais relevantes das deformações permanentes.

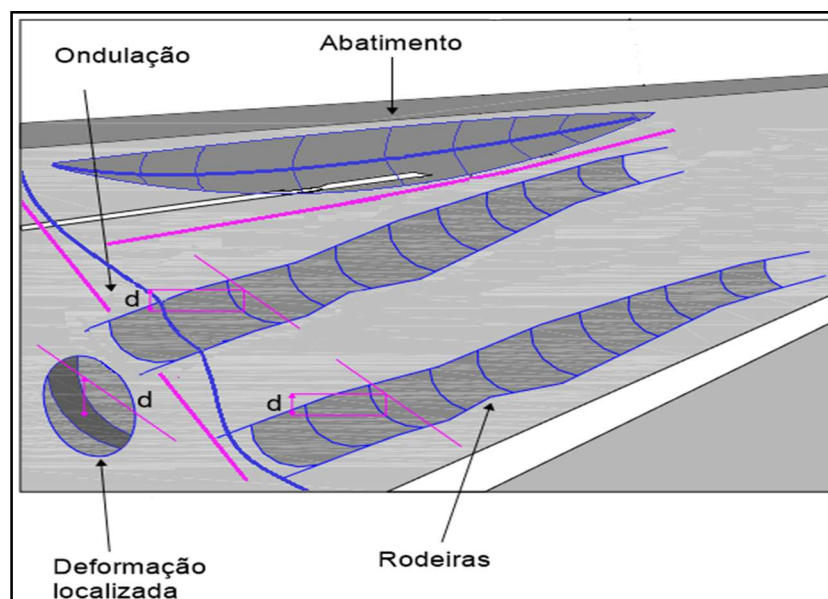


Figura 2.2 – Efeitos das deformações em pavimentos flexíveis
(Adaptado de ESTRADAS DE PORTUGAL, 2008)

2.1.2. Fendilhamento

O fendilhamento compõe uma das mais usuais degradações que ocorrem sobre os pavimentos flexíveis, e seu surgimento é diretamente associado a uma diminuição da capacidade estrutural da via. As variações da manifestação do fendilhamento ocorrem de acordo com o quadro abaixo (Quadro 2.2), e podem ser classificadas de acordo com suas direções, origens e efeitos.

Fendilhamento	Fendas	Fadiga	
		Longitudinais	Eixos
			Bermas
		Transversais	
	Parabólicas		
	Pele de Crocodilo	Malha fina (≤ 40 cm)	
		Malha larga (>40 cm)	

Quadro 2.2 – Classificação das patologias por Fendilhamento
(Adaptado de PEREIRA E MIRANDA, 1999)

A caracterização das fendas pode ser feita através de quatro grupos de análise, constituídos pelas fendas por fadiga, que são oriundas do processo de fadiga do pavimento, as fendas longitudinais que podem surgir próximo ao eixo da faixa de rolamento ou próximo as bermas, as fendas transversais que ocorrem no plano transversal da via juntamente com as fendas parabólicas que se apresentam no local de contato entre o pavimento e a roda dos veículos, neste último tipo de fenda também é possível classificar entre orientadas transversais, orientadas longitudinais e não orientadas. A origem das fendas pode ocorrer por meio de vários fatores, mas usualmente está ligado a fatores climáticos, instabilidade nas camadas superficiais, problemas nas ligações entre as camadas betuminosas inferiores e principalmente por meio da fadiga dos elementos presentes na composição das misturas betuminosas.

Já o grupo de fendilhamento que compõe o subgrupo pele de crocodilo, pode ser compreendido como a evolução dos vários processos de fendas que compõem a via. Sua composição se dá pela junção das várias fendas existentes, resultando na formação de

malhas de fendas, que podem ser caracterizadas de acordo com suas dimensões. Esta classificação pode ser feita de acordo a abertura das malhas resultante, sendo que a determinação de uma malha estreita implica que a abertura da malha seja inferior ou igual a quarenta centímetros, já as malhas largas, possuem aberturas maiores do que quarenta centímetros. De modo a facilitar o entendimento sobre os efeitos do fendilhamento é explicitado a figura abaixo (Figura 2.3) com os principais efeitos do fendilhamento sobre um pavimento rodoviário flexível.

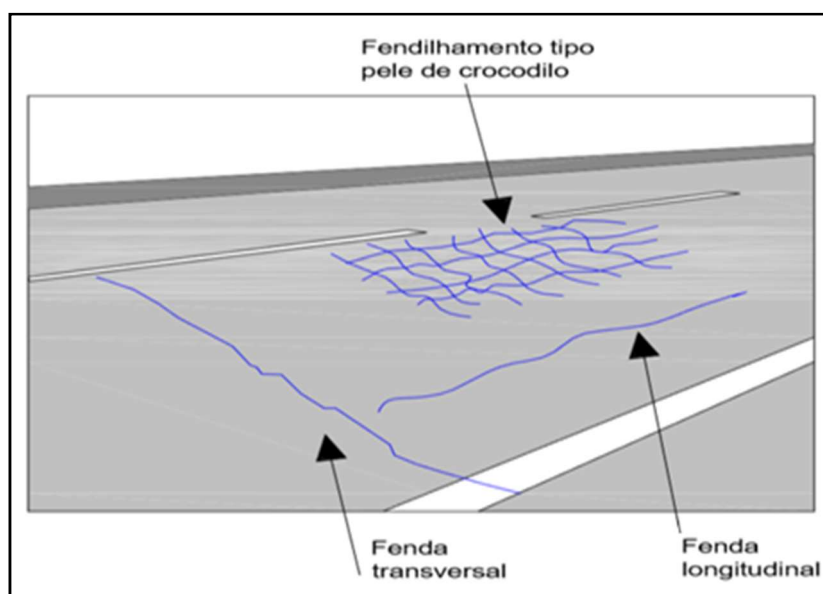


Figura 2.3 – Efeitos de Fendilhamento em pavimentos flexíveis
(Adaptado de ESTRADAS DE PORTUGAL, 2008)

2.1.3. Desagregação da camada de desgaste

O surgimento desta patologia está diretamente ligado a perda de capacidade das camadas superficiais, em especial da camada de desgaste. Com o decorrer do tempo e a evolução do pavimento, os materiais que compõem as misturas betuminosas perdem parte das suas características, acabando por expor parte ou totalidade dos materiais que compõem a camadas de desgaste do pavimento resultando no desprendimento dos agregados, sendo de acordo com o quadro a seguir (Quadro 2.3) demonstrado as formas de manifestações desta patologia sobre a via.

Desagregação da camada de desgaste	Cabeça de gato
	Desagregação superficial
	Pelada
	Ninhos (covas)

Quadro 2.3 – Classificação das patologias por desagregação da camada de desgaste (Adaptado de PEREIRA E MIRANDA, 1999)

Com o processo da desagregação, as camadas de desgaste acabam por perder elementos mais finos que constituem a camada, o que acaba por resultar no surgimento das cabeças de gatos, que se refere a uma degradação do pavimento em que consiste na expansão da macrotextura da faixa de rolamento, destacando os agregados em face da camada de desgaste, o que pode ser extremamente benéfico do ponto de vista drenante do pavimento, mas que acaba por aumentar o desgaste dos pneus em contato com a via e conseqüentemente um aumentado considerável nos ruídos resultantes dessa ação.

A evolução da fase das cabeças de gatos resulta nas degradações superficiais, que é a principal variação desta patologia, devido à fraca ligação entre agregados e ligantes, e a maior exposição devido a perda de finos, resulta no desprendimento de agregados grossos da camada de desgaste, o que dá origem a outra variação dessa degradação, conhecida como pelada, que consiste no desprendimento de partes das camadas de desgaste em relação às camadas inferiores.

Devido à evolução das fendas, por meio da formação das peles de crocodilo, as mesmas tendem a ter a desagregação das bordas das fendas, o que resulta na formação de Ninhos, que é outra degradação da família da desagregação da camada de desgaste, consistindo em pequenas aberturas sobre a via, de acordo com (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008) “*Os ninhos ou covas são os estágios últimos no processo de degradação de um pavimento, com efeitos severos sobre os veículos, sofrendo ao mesmo tempo a ação acrescida destes, acelerando assim a evolução da degradação do pavimento*”, desta forma representa-se por meio da figura em seguida (Figura 2.4) as formas de manifestação desta patologia sobre um pavimento.

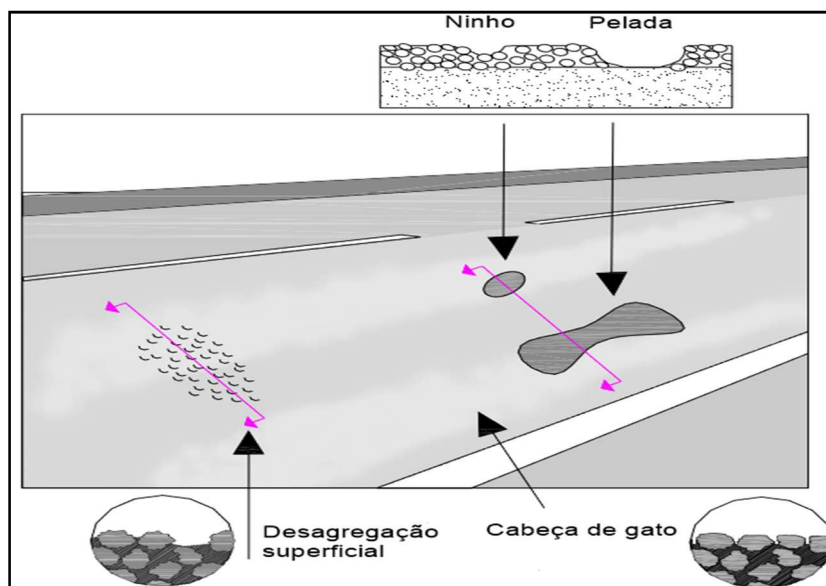


Figura 2.4 – Efeitos da desagregação da camada de desgaste
(Adaptado de ESTRADAS DE PORTUGAL, 2008)

2.1.4. Movimento de materiais

Esta patologia recorrente em pavimentos com um já elevado grau de degradação consiste numa movimentação dos materiais que compõem as camadas do pavimento, quer seja nas camadas betuminosas, granulares e até mesmo no solo de fundação. Sua caracterização pode ser feita igual no quadro abaixo (Quadro 2.4):

Movimento de materiais	Exsudação
	Subida de finos

Quadro 2.4 – Classificação das patologias por movimento dos materiais
(Adaptado de PEREIRA E MIRANDA, 1999)

A ocorrência deste tipo de patologia em um pavimento está diretamente ligada com as condições do seu estado hídrico. Usualmente pode se associar a pavimentos com este tipo de dano, problemas de drenagem e um alto grau de fendas existente no mesmo. A resultante desta junção de fatores consiste no surgimento de um nível freático com cota elevada, que pode atingir as fundações da via e as demais camadas, podendo assim

comprometer o seu funcionamento. Com um alto nível de presença de fendas sobre o pavimento, o acúmulo de águas dentro das camadas granulares e sobre o solo fundação ocorre de forma gradual, o que consiste no surgimento da primeira variação da patologia de movimento de materiais. A subida de finos ocorre devido aos esforços derivados do volume de tráfego que atuam sobre o pavimento, ao passarem sobre a via os mesmos geram esforços de compressão, o que resulta em uma retirada das águas de dentro do pavimento para a superfície através dos fendilhamento presentes nas camadas superficiais, conseqüentemente esta reação acaba por arrastar juntamente com as águas um número considerável de finos que constituem parte da estrutura, alterando assim parte da composição do pavimento flexível.

Outra variação da patologia de movimento de materiais é a exsudação representada de acordo com a figura a seguir (Figura 2.5), o resultado da sua ocorrência também consiste em alterar a composição dos materiais existente no pavimento. Sua presença atua principalmente na camada de desgaste, e consiste na expulsão de aglutinantes para superfície do pavimento, o que acabam por envolver os materiais granulares das camadas superficiais, resultando em uma drástica redução da macrotextura da via.

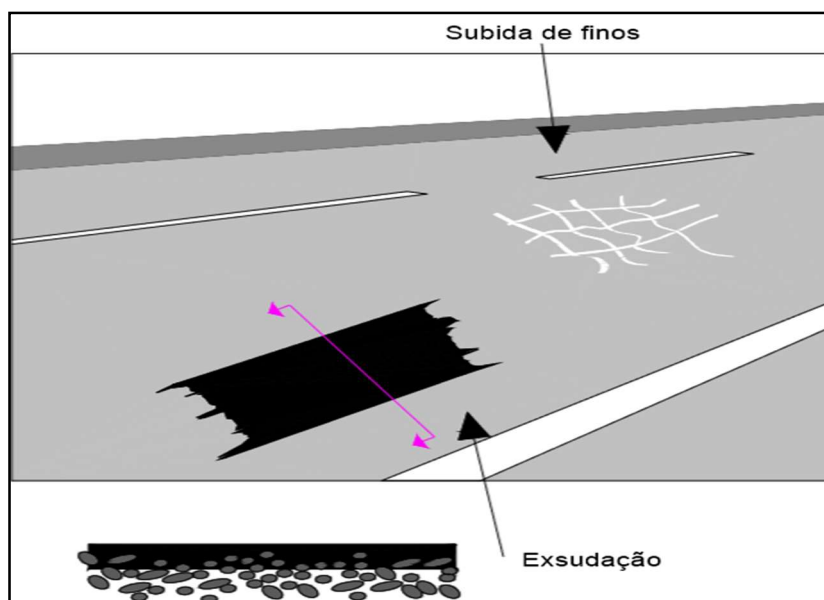


Figura 2.5 – Efeitos do movimento de materiais em pavimentos flexíveis

(ESTRADAS DE PORTUGAL, 2008)

2.1.5. Reparções

As reparações não são consideradas diretamente como uma família de degradações que atuam sobre os pavimentos flexíveis, porém a sua existência na via, significa que em parte do pavimento já houve um desgaste em relação às demais, resultando assim na diminuição da capacidade estrutural da via neste local. A presença de reparações em um local da via exige que os problemas relacionados à sua origem sejam devidamente corrigidos, pois a falta de um correto tratamento pode acabar no ressurgimento do dano, por meio de alguma patologia associada a pavimentos flexíveis, sendo que os problemas iniciais ocorrerão pelo surgimento de fendas e deformações permanentes. Desta forma, de acordo com (PEREIRA & MIRANDA, 1999) “*Em geral, as reparações também devem ser consideradas como patologias, sendo classificadas de acordo com a sua qualidade de execução e naturalmente em função do seu estado, em particular das juntas de reparações.*”

2.2. Causa e efeito das degradações

A deterioração de um pavimento está diretamente ligada a perda das capacidades dos materiais de composição e a respectiva alteração de suas características. Esta mudança ocorre devido a fatores da via e fatores externos, os materiais de composição, fatores climáticos e ações relacionadas aos esforços resultantes do tráfego, que acabam por definir o comportamento da vida residual da pista com o decorrer do seu tempo de utilização.

De acordo com (PEREIRA & MIRANDA, 1999) “*A observação sistemática de pavimentos em serviço, assim como a análise detalhada do comportamento de trechos experimentais, possibilita a definição de uma causa-efeito entre as degradações*”. Desta forma, de acordo com o quadro na sequência (Quadro 2.5) é possível correlacionar às degradações recorrentes que atuam em um pavimento flexível de acordo com o fator causador da degradação, podendo assim explicitar uma relação de causa e efeito.

DEGRADAÇÕES	FATORES DE DEGRADAÇÃO									
	Condições de drenagem	Sub-dimensões da camada de desgaste	Sub-dimensões das camadas inferiores	Capacidade de suporte da fundação	Qualidade dos materiais	Deficiências de execução	Ligação entre camada base e de desgaste	Agressividade do tráfego	Ações climáticas	Camadas estruturais de reduzida compactade
<i>Rodeiras de pequeno raio</i>		***			***	**	**		***	***
<i>Rodeiras de grande raio</i>	***	*	**	***	***	*	**		**	**
<i>Abatimento</i>	***		**	***	***	**	*		*	*
<i>Deformação localizada</i>	***		**	***	**	**	*		**	*
<i>Ondulação</i>		**	**	***	**	***	*		**	*
<i>Fendas isoladas</i>	**	**	**	**	***	**	***	**	***	***
<i>Fendas múltiplas</i>	*	**			**	**	**	***	***	***
<i>Pele de crocodilo</i>	**	**	**	**	***	**	***	***	***	***
<i>Cabeça de gato</i>		*				**	**		***	*
<i>Desagregação superficial</i>					**	***	***		**	***
<i>Ninhos</i>		**	*		***	***	***	**	**	**
<i>Pelada</i>		***	*		**	**	**	***	***	**
<i>Exsudação</i>						**	***		***	***
<i>Subida de finos</i>	***				*	*	**		**	**

Legenda: Muito importante *** ; Importante ** ; Pouco importante *

Quadro 2.5 – Classificação das relações entre as degradações e os fatores de degradação (Adaptado de BRANCO, PEREIRA e SANTOS, 2008)

Segundo (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008)“*Esta classificação pretende apenas dar uma indicação aproximada daquelas relações. Entretanto, o diagnóstico de casos reais deve resultar sempre de uma observação in situ das condições envolventes de qualquer patologia em estudo.*”

Neste âmbito conclui se que os principais fatores que determinam a degradação de um pavimento flexível são as ações do tráfego, ações climáticas, comportamento mecânico dos materiais e problemas relacionados a execução da obra, sendo que o processo de deterioração da via ocorre por meio de um ciclo de esforços e alterações das propriedades dos materiais, tendo como evolução das patologias a esquematização de acordo com o fluxograma abaixo (Figura 2.6).

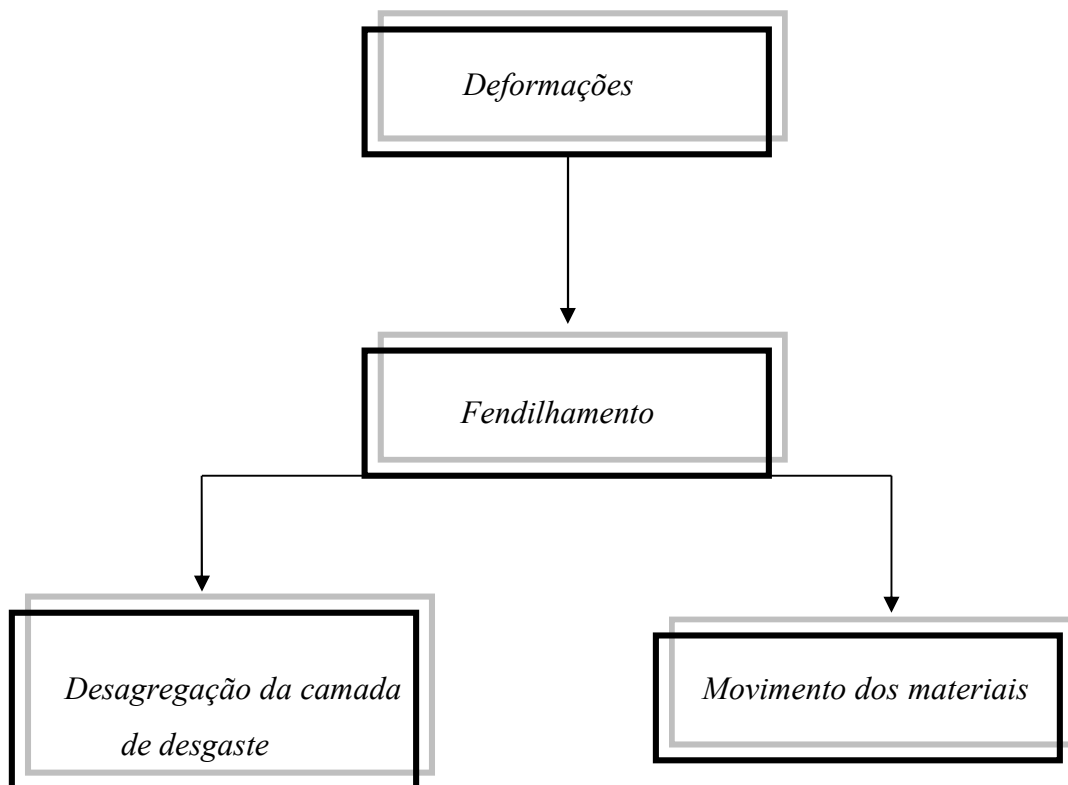


Figura 2.6 – Esquematização da sequência de evoluções das degradações

3. METODOLOGIAS DE OBSERVAÇÃO DOS PAVIMENTOS

Os pavimentos flexíveis apresentam em si um grande desafio quanto ao seu levantamento de estado de degradação, tais dificuldades estão relacionadas com o elevado número de variações de patologias existentes e devido a sua própria extensão, o que acaba por dificultar todo o processo de análise e classificação do estado da via.

Pode se afirmar que é essencial possuir as reais informações do estado da via para a elaboração de uma intervenção de modo a reabilitar um pavimento degradado, principalmente quando a escolha da reciclagem de pavimento possa estar cotada para escolha como metodologia de reabilitação. Pois através de uma relação comparativa entre o real estado do pavimento e as características que se desejam do mesmo acabam por auxiliar na determinação da viabilidade da reciclagem, ou por vezes descartar sua utilização, o que ocorre nos pavimentos com grandes problemas a nível de capacidade estrutural, onde não se justifica a utilização da reciclagem do ponto de vista da eficácia e economia.

Deste modo é necessário a existência de planos de observações e classificação do pavimento de modo a se conhecer as suas características e sua evolução ao decorrer do seu tempo de vida útil. Na execução da observação dos pavimentos, deve se considerar dois elementos essenciais para uma análise coerente da via, que são os reais objetivos para observação do pavimento e os meios humanos e materiais a disposição para sua elaboração. Através da definição dos objetivos, pode se definir qual melhor metodologia a se utilizar, sendo por vezes as observações preventivas ou periódicas e por vezes as observações patológicas.

A observação periódica consiste em uma sistematização de dados, de modo a analisar e classificar as condições da via de forma periódica, explicitando o seu real estado de utilização e conservação e conseqüentemente seu estado evolutivo. Já as patológicas são métodos de observação que se utiliza de informações derivadas das observações periódicas com o intuito de realização de análises mais detalhadas de determinados trechos do pavimento, resultando na elaboração de medidas e procedimentos que visam à preservação das condições iniciais do projeto.

Um fator de extrema relevância face a observação dos pavimentos é a determinação das condições iniciais do projeto, que significam as informações e características que possibilitem a caracterização do estado inicial da via, quer seja em pavimentos novos ou em pavimentos já em funcionamento, mas que foram alvos de processos de reestruturação por meio da reabilitação de pavimentos. Segundo (PEREIRA & MIRANDA, 1999) *“Estes dados constituem uma informação essencial para a interpretação dos dados que forem sendo obtidos ao longo da vida do pavimento. A este conjunto de dados chama-se por vezes ponto zero do pavimento”*.

Sendo uma das principais dificuldades no processo de observação dos pavimentos, a extensão da via acaba se tornando um limitador em relação aos recursos humanos disponíveis e por vezes até no ponto de vista econômico do processo e no seu grau de precisão. Desta forma é possível a escolha de duas opções distintas para sua execução, que seriam a observação completa de toda a extensão do pavimento ou proceder sua análise através de amostragem, o que implica nessa segunda escolha em uma análise mais rigorosa das partes definidas no processo, pois os mesmos terão que ser representativos para o pavimento em questão.

Para a determinação de um plano de observação do pavimento é necessário a escolha de trechos que possuem a mesma semelhança de estrutura e função, numa fase inicial determina se segmentos no interior da extensão da via, esses segmentos devem ser homogêneos relativamente a alguns fatores, que de acordo com (PEREIRA & MIRANDA, 1999) podem ser descritos como:

- Volume de tráfego;
- Tipo de pavimento;
- Começo e término de um distrito;
- Começo e término dos projetos construtivos;
- Começo e término de um segmento de observação periódico;
- Cruzamento com uma via de relevância.

As definições desses segmentos determinam intervalos onde devem ser feitas as observações, desta forma se torna mais fácil analisar o estado do pavimento de acordo

com parâmetros definidos no início do processo. Porém se a metodologia de observação optar pela observação por amostragem, esses segmentos devem ser divididos em “sub-segmentos” semelhantes, dando origem a uma das etapas que exigem maior atenção em sua elaboração, pois a falta de representatividade dos sub-segmentos elimina a relevância das respostas em relação à extensão total do segmento subdividido. Os critérios de semelhança que definem a determinação de sub-segmentos segundo (PEREIRA & MIRANDA, 1999) são:

- Começo e término de um segmento;
- Composição do pavimento (materiais, camadas, espessuras);
- Composição do solo de fundação;
- Características da drenagem;
- Estado de deterioração da via.

Quanto à definição de extensões mínimas e máximas de segmentos e sub-segmentos não se possui nenhuma determinação específica, pois sua definição é feita de acordo com suas relações de semelhanças e homogeneidade, porém existem certos limites indicados as extensões dos sub-segmentos. A extensão total de um sub-segmentos não pode ser muito extensa, devido à necessidade de se preservar a representatividade das reais características do pavimento que podem ser alteradas devido a longas observações. Desta forma busca se evitar a dispersão de informações, mantendo sempre a confiabilidade das respostas em base das homogeneidades do sub-segmentos, com essa mesma intenção também se evita trechos muito reduzidos, de forma que o mesmo mantenha se representativo da via como um todo, por isso indica-se sub-segmentos com valores entre duzentos a quinhentos metros de comprimento.

Com a intenção de se manter a credibilidade de uma observação por amostragem, além de se utilizar dos fatores para a divisão de segmentos e sub-segmentos, juntamente levando em conta seus valores máximos e mínimos, determina se também porcentagem da extensão total da via a serem observadas. Esses valores andam entre os cinco por cento e vinte e cinco por cento da extensão total da via, a determinação desta porcentagem tem relação com a relevância do pavimento juntamente com seu valor estratégico, além da própria falta de homogeneidade dos segmentos

analisados, o que implica em maiores trechos a serem observados, são levados em conta também os recursos disponíveis para sua aplicação, levando em consideração os recursos humanos, materiais e financeiros para a prática desta atividade

Após a finalização em gabinete das escolhas de segmentos e porcentagens a serem observadas, deve se partir para a marcação e identificação “in situ” destes locais. A determinação destes pontos pode ser feita mediante auxílio de aparelhos GPS com localizações geográficas e também por marcos quilométricos em relação a um sistema de referenciamento adequado. A determinação destes pontos é de extrema importância, pois após a conclusão desta fase pode se dar início a aplicação das técnicas de avaliação das características dos pavimentos, o que irá na prática determinar as condições reais do pavimento e respectivamente sua evolução com o decorrer do tempo.

3.1. Técnicas de avaliação e equipamentos

De forma a esclarecer todas as fases que envolvem o processo de observação dos pavimentos flexíveis e levando em conta seus principais métodos utilizados e objetivos finais, os fatores a serem avaliados podem ser descritos de acordo com a seguinte relação:

- Capacidade estrutural da via;
- Estado superficial;
- Regularidade longitudinal;
- Irregularidade transversal;
- Atrito do pavimento.

Desta forma apresenta-se a seguir um breve estudo das respectivas técnicas de avaliação das características do pavimento citadas acima, sendo apresentados suas principais características, metodologias de aplicação e os equipamentos mais relevantes utilizados na caracterização das condições de um pavimento rodoviário flexível existente.

3.1.1. Avaliação da capacidade estrutural

A determinação da capacidade estrutural de um pavimento está diretamente relacionada com a deformação vertical da via em resultado da aplicação de determinados carregamentos sobre sua superfície. Em geral procura-se através das deformações resultantes a componente elástica das deformações do pavimento, o que traduz por outros meios na capacidade de carga da via. Os equipamentos que realizam a definição da capacidade estrutural da via são conhecidos como deflectómetro ou deflectógrafos (Figura 3.1) sendo que em alguns equipamentos são analisados apenas as deformações completas do pavimento, algo que para pavimentos recentes e bem projetados se torna irrelevante em comparação as deformações elásticas. O resultado obtido pela deformação do pavimento é tratado como deflexão e consiste no assentamento vertical das camadas superficiais da via em observação.

Existem vários equipamentos que realizam essas avaliações, suas principais diferenças estão associadas quanto à origem da aplicação da carga, os primeiros aparelhos desenvolvidos utilizam a aplicação de cargas de forma estática ou quase estáticas, conforme a figura na sequência (Figura 3.2) geralmente por meio de pneus associados a veículos com elevado peso. Sendo esse fator que difere totalmente dos aparelhos recentes que realizam o ensaio por meio da aplicação de cargas por meio da queda de uma determinada massa a certa altura, na qual o impacto gerado sobre placas previamente instaladas no pavimento traduzem sua deformação e respectivamente sua componente de deformação elástica.

A determinação da capacidade estrutural de uma via tem diversos objetivos, já nos processos de reabilitação de pavimentos seu papel está relacionado na definição de camadas reforços, que são determinados de acordo com valores de deflexões obtidas no pavimento em análise. Dentro os vários equipamentos que avaliam a capacidade estrutural da via citam-se como mais representativos os seguintes equipamentos:

- Viga Benkelmann;
- Deflectógrafo Lacroix;
- Deflectómetro de impacto (FWD).

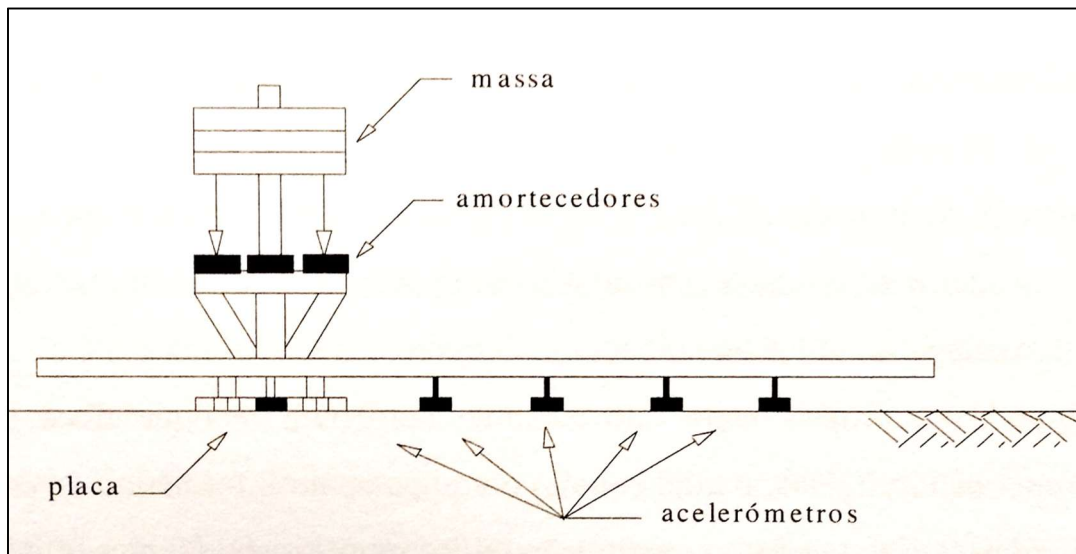


Figura 3.1 – Deflectómetro de impacto FWD (PEREIRA & MIRANDA, 1999)

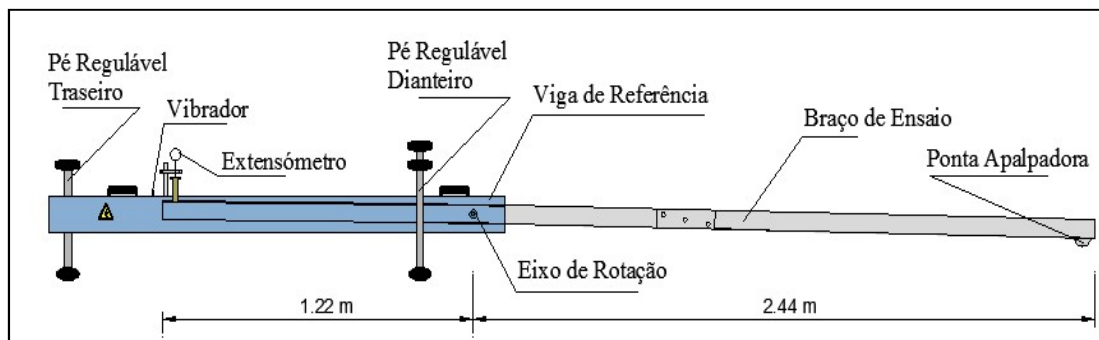


Figura 3.2 – Viga Benkleman – (FRANCISCO, 2012)

3.1.2. Avaliação do estado superficial

As degradações visíveis á superfície da via constituem um fator totalmente relevante na caracterização da qualidade estrutural e funcional de qualquer pavimento, porém os mesmos apresentam problemas quanto à velocidade do seu levantamento de dados e também quanto à confiabilidade dos resultados, haja vista que um grau de deterioração pode ser interpretado de forma distinta por pessoas diferentes.

Atualmente o levantamento de dados sobre o estado superficial dos pavimentos flexíveis ocorre usualmente por meio de duas metodologias: observação visual com diferentes possibilidades de registro de dados e conseqüentemente o tratamento das informações após o término do processo, e observação por meio de equipamentos de capturas visuais como vídeos e fotografias. Existe também a utilização de aparelhos que se utilizam de raios laser para levantamento de informações, contudo seu uso é mais direcionado para danos relacionados com fendilhamento, e seu uso ainda tem reduzida utilização em meio às observações de pavimentos.

A análise visual presencial é feita por meio de um técnico que se desloca pela via, por vezes com o auxílio de um veículo a reduzida velocidade ou até mesmo caminhando sobre o pavimento, onde o mesmo cataloga informações como tipo de danos, gravidade, localizações e extensões das degradações. A entrada de informações ocorre por meio de formulários específicos para essa atividade ou através do auxílio de suportes informáticos, o que acaba por gerar um dos maiores problemas relacionado a essa atividade, que é a subjetividade na determinação das informações.

A mesma degradação pode ser descrita de forma diferente por dois operadores ou até mesmo pelo mesmo operador devido à presença de condições diferentes como iluminação, ângulo de visão e presença de água. Outro fator negativo em relação a essa prática é a reduzida velocidade do seu levantamento, um técnico com experiência nesse tipo de levantamento de informações consegue cobrir no máximo entre 10 a 20 km por dia, variando de acordo com o nível de deterioração do pavimento e rigor da observação.

De forma a evitar a subjetividade e acelerar o processo de decisão do técnico que observa o pavimento, desenvolve-se os catálogos de degradações (ESTRADAS DE PORTUGAL, 2008), que são documentos que padronizam os danos de acordo com sua origem, nível e extensão auxiliando o utilizador na definição de um dano e aumentando a velocidade no processo de observação da via.

Mesmo com o auxílio dos catálogos de degradação, as observações locais geram problemas de segurança na pista, devido à reduzida velocidade do operador ou veículo de apoio, desta forma a preferência pela utilização de equipamentos de capturas de imagem da via para posterior tratamento em outro ambiente tem aumentado. Esses

equipamentos consistem em veículos com equipamentos conforme a figura abaixo (Figura 3.3) que filmam e fotografam o pavimento a velocidades de 40 a 60 km/h, e que também referenciam as imagens de acordo com sua localização e extensão. Nesta prática a existência da subjetividade existe devido à necessidade de se visualizar as gravações e imagens, porém seu grau é altamente reduzido devido à possibilidade de repetições das imagens, o que conseqüentemente aumenta a fiabilidade dos resultados, não perturba a circulação dos veículos com reduzidas velocidades de deslocamento e diminui os custos das operações, devido a não ser necessário o retorno ao pavimento em caso de dúvidas na determinação de um dano, o que torna este um dos recursos mais eficientes em relação à observação do estado superficial da via. Em relação aos recursos utilizados na observação e avaliação do estado superficial dos pavimentos flexíveis pode-se destacar como os mais relevantes os seguintes:

- Catálogos de degradações;
- Observação visual das degradações;
- Observação das degradações assistidas por computador;
- Equipamentos multifunções (ARAN, RST, CALAO, GERPHO).

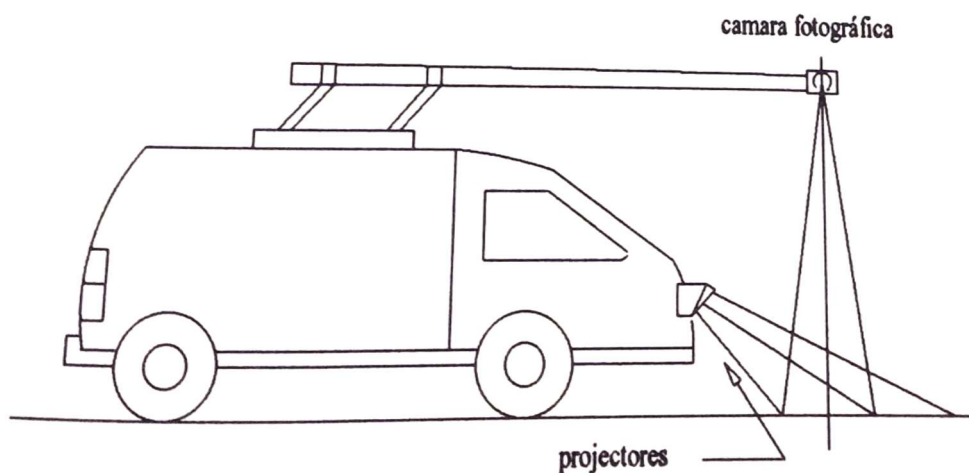


Figura 3.3 – Equipamento de observação via câmera fotográfica GERPHO (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008)

3.1.3. Avaliação da irregularidade longitudinal

Na execução de pavimentos rodoviários sempre existe uma diferença entre o perfil longitudinal de projeto e o perfil realizado. A essa diferença é atribuída o nome de irregularidade longitudinal. As ocorrências dessas variações não apresentam um padrão específico, e em resumo pode se afirmar que a variação entre o perfil real e o perfil de referência ocorre de forma aleatória.

Em relação a essas irregularidades, as mesmas podem ser caracterizadas de duas formas, sendo a primeira do ponto de vista da geometria, onde se analisa a diferença entre a geometria da via em comparação a geometria ideal, e do ponto de vista dos efeitos físicos gerados por essa irregularidade. No segundo ponto entende-se a irregularidade como todos os danos na superfície do pavimento que são possíveis de gerar vibrações nos veículos que atuam sobre o pavimento, e já na primeira situação pode se associar ao conjunto de desníveis entre o perfil teórico e o perfil longitudinal real.

As determinações da irregularidade em qualquer uma das formas de caracterização representam a utilização de equipamentos e análises diferenciadas, sendo que o processo é de elevada complexidade, pois se trata da alternância altimétrica do perfil ao longo de toda extensão do pavimento. As ocorrências dessas variações influenciam diretamente aos usuários do pavimento, afetando diretamente características como conforto e segurança, podendo evoluir de forma a afetar a capacidade estrutural do pavimento, pois a produção de oscilações e vibrações no processo de passagem do veículo sobre o pavimento aumentam as cargas dinâmicas dos veículos pesados que atuam sobre a via, e em alguns casos diminuem o atrito em determinados locais, devido à redução da carga dinâmica em resultado da variação dos desníveis do perfil.

Ao longo dos anos, houve o desenvolvimento de vários equipamentos para a análise e medição da irregularidade longitudinal dos pavimentos. Os equipamentos baseados em respostas dinâmicas (Figura 3.4) de um veículo não são muito utilizados devido às dificuldades de se manter a confiabilidade dos resultados ao longo do tempo,

já os equipamentos de referência geométrica simples tem pouco uso por conta do seu baixo rendimento e as dificuldades relacionadas à sua operação. Atualmente os equipamentos que determinam uma “imagem” do perfil superficial do pavimento são os mais utilizados para essa atividade, sendo denominado como perfilômetros (Figura 3.5), esses equipamentos apresentam resultados mais representativos da realidade, e apresentam mais facilidade quanto à sua utilização para a análise do perfil da via.

Entre os equipamentos citados anteriormente para a análise da irregularidade do perfil longitudinal de um pavimento flexível, podem-se apresentar de forma representativa os equipamentos mais utilizados de acordo com cada parâmetro de sua utilização, sendo eles de acordo com (PEREIRA & MIRANDA, 1999) os seguintes equipamentos:

- Régua de 3 metros
(Equipamento de referência geométrica simples);
- Bunb Intregador, Mays Meter, NASS
(Equipamentos baseados na resposta dinâmica de um veículo);
- Perfilômetro APL, Perfilômetro General Motors
(Equipamento baseados na obtenção de uma imagem do perfil do pavimento).



Figura 3.4 - Bunb Intregador (RODRIGUES, 2013)



Figura 3.5 - Perfilômetro APL (RODRIGUES, 2013)

3.1.4. Avaliação da irregularidade transversal

A avaliação da irregularidade transversal consiste na determinação do perfil transversal do pavimento. As principais razões para a determinação do perfil da via são as seguintes:

- Avaliação da inclinação transversal do pavimento, buscando comparar a realidade da via com as determinações do projeto;
- Verificar a existência de zonas onde possa haver acúmulo de águas;
- Caracterização da evolução do pavimento de acordo com comportamentos relacionados a compactação de solo, deformações plásticas e assentamentos.

Para a determinação do perfil transversal da via pode se utilizar equipamentos de referência geométrica simples o que ocorre com os equipamentos mais antigos, ou podem também utilizar equipamentos mais sofisticados que utilizam tecnologias de raio laser e aparelhos de ultra-sons conforme a figura a (Figura 3.6), entre os mais usuais pode-se destacar:

- Régua de três metros
(*Referência geométrica simples*);
-

- Equipamentos multifunções ARAN, RST, PALAS
(*laser e ultra-sons*).



Figura 3.6 - Equipamentos multifunções ARAN (Adaptado de ROAD TALK, 2016)

3.1.5. Avaliação dos coeficientes de atrito no pavimento

A determinação do atrito existente em uma camada superficial de um pavimento flexível pode ocorrer de três formas distintas:

- Avaliação de atrito pontual, sem utilização de pneus;
- Avaliação de atrito longitudinal, com utilização de pneus travados;
- Avaliação de atrito transversal, com utilização de pneus livres.

A avaliação a aderência entre o pneu e o pavimento serve como indicador do comportamento funcional do pavimento, uma relação coerente de atrito da via garante características de drenagem superficial, segurança em frenagens e estabilidade em desenvolvimento de manobras pela via.

A caracterização do atrito pontual pode ser feita de acordo com vários equipamentos, usualmente e utilizado o pêndulo britânico (Figura 3.7), sua determinação visam a zonas específicas e pode ser utilizado também para estudos relacionados aos agregados de composição da via. Já a avaliação do atrito longitudinal é feita pela frenagem temporária de reboques tracionados a altas velocidades, onde é avaliado, a força desenvolvida na interface do pneu neste processo. Por último descreve se a determinação do atrito transversal, que para os pavimentos rodoviários é o fator de maior relevância. Sua caracterização é feita através de equipamentos que utilizam pneus que fazem um determinado ângulo com o direcionamento de locomoção do veículo do ensaio (Figura 3.8), onde é avaliado, a razão entre a força perpendicular ao plano de rotação do pneu e a ação vertical ao pavimento por conta da carga suspensa sobre a roda. De acordo com os equipamentos mais utilizados para esses fins, pode-se citar como os mais representativos os seguintes:

- Pendulo Britânico
(Equipamento de atrito pontual)
- SCRIM
(Equipamentos de continuo atrito transversal)



Figura 3.7 – Pêndulo Britânico (COOPER, 2009)



Figura 3.8 – Equipamentos de continuo atrito SCRIM (Volvo VHD, 2014)

3.2. Frequência da observação

A determinação da frequência de observação pode ser feita de acordo com vários parâmetros, mas os principais elementos que influenciam nessa determinação são usualmente, os recursos disponíveis, estado de degradação da via, tipo de análise que se pretende desenvolver e principalmente ao nível de necessidade de informações de acordo com a relevância do pavimento rodoviário.

Segundo (PEREIRA & MIRANDA, 1999) “*Em muitos sistemas de gestão a periodicidade geralmente adotada é de dois anos*”. Entretanto, devido à variedade de fatores que influenciam a qualidade de uma via e devido à sua complexidade em termos de funcionamento indica-se que a determinação das frequências de observação seja feita em períodos diferentes, variando de acordo com a evolução dos parâmetros que caracterizam o pavimento.

Desta forma em relação aos fatores que caracterizam os pavimentos, recomenda-se de acordo com (PEREIRA & MIRANDA, 1999) as seguintes frequências:

a) Deflexão

Inicialmente para fins de determinação de um comportamento regular no início da utilização da via recomenda-se um período de dois anos, sendo posteriormente prolongado para quatro anos no decorrer da vida útil do pavimento. Porém, já na fase final de utilização do pavimento essa frequência pode ser reduzida para cada dois anos ou até mesmo anualmente.

b) Degradações

A recomendação segundo este fator é de frequência a cada dois anos, mas com o decorrer da vida útil da via e seu nível de deterioração este intervalo deve ser reduzido para intervalos de um ano.

c) Irregularidade

Este fator tem reduzida evolução de acordo com o tempo, por isso determina-se um período de dois anos entre as observações na fase inicial de avaliação do pavimento, sendo alargado para quatro anos nas demais observações.

d) Aderência

Já este fator possui uma sensibilidade alta nos anos iniciais da abertura do pavimento, e depois evolui de forma reduzida no decorrer da vida útil da via. Desta forma recomenda-se a periodicidade de um ano nos dois primeiros anos de observação de modo a encontrar trechos com evolução anormal, logo após essa fase pode se definir a observação com intervalos de quatro anos.

De forma genérica indicam-se as frequências de observações da via de acordo com o (Quadro 3.1), sendo que a sua aplicabilidade deve ser revista de acordo com os resultados adquiridos na fase inicial de observação do pavimento.

Fatores	Frequência de observação				
Deflexão	n	n+2	n+6	n+10	n+12
Degradações	n	n+2	n+4	n+6	n+8
Irregularidade	n	n+2	n+6	n+10	n+14
Atrito	n	n+1	n+5	n+9	n+13

n : Ano de entrada de serviço

Quadro 3.1 – Frequência da observação (PEREIRA & MIRANDA, 1999)

3.3. Dados Auxiliares

Na concepção de qualquer estudo de pavimentos rodoviários deve se ter em conta dois tipos de bases de dados: os dados que determinam o estado do pavimento que são os fatores caracterizadores já citados anteriormente, juntamente com os dados auxiliares a esse pavimento. Estes dados auxiliares podem ser entendidos como as informações que melhoram o entendimento sobre seu real comportamento. Entre esses dados auxiliares ao pavimento, para um plano de observação bem estruturado pode-se afirmar como essenciais os seguintes dados:

- Caracterização geométrica da via (traçado em planta e em perfil);
- Volume de tráfego;
- Relatórios e informações sobre acidentes;
- Caracterização de todos os trabalhos desenvolvidos no pavimento;
- Condições climáticas.

Estas informações são imprescindíveis para a elaboração de qualquer de plano de observação e detalhamentos da evolução da via, sendo essenciais também para as demais fases da reabilitação dos pavimentos algo que será tratado com maior detalhamento no próximo capítulo.

4. ETAPAS INICIAIS NO PROCESSO DE REABILITAÇÃO

A utilização das técnicas de reciclagem de pavimentos apresenta uma série de vantagens em relação às técnicas de reabilitação convencionais, desde o ponto de vista econômico, sustentável e de resultados de eficácia quanto à concepção e manutenção de pavimentos flexíveis. Porém para a determinação da viabilidade desse tipo de técnica construtiva, é essencial uma fase de estudos preliminares sobre o projeto, de modo a determinar se é realmente benéfico a escolha da reciclagem de pavimentos como uma ferramenta na reestruturação do pavimento degradado em questão.

Esta fase de análise de um projeto de reabilitação possui um alto grau de relevância dentre os processos construtivos, pois o resultado desse estudo acaba por definir a aplicabilidade ou não da reciclagem como método construtivo, mas também acaba por influenciar o ambiente onde será feita a reciclagem e conseqüentemente a melhor técnica a ser empregada. Como esta fase inicial faz parte de um todo quanto ao processo construtivo por meio da reciclagem, pode-se analisá-lo de forma distinta por conta da sua importância no resultado final do projeto.

Neste âmbito, definiu-se esta fase como um processo construtivo preliminar, e pode-se subdividir em três pontos principais:

- Caracterização da via a reabilitar;
- Caracterização dos materiais;
- Determinação da taxa de reciclagem.

Por meio destas informações o responsável pelo projeto pode determinar a melhor escolha para a reabilitação do pavimento, de forma que a mesma tenha o maior rendimento possível e com o menor grau de investimento de recursos, explorando o máximo potencial de cada técnica de reabilitação de pavimento por meio da reciclagem.

Após a conclusão deste processo, o projetista já irá deter um nível de informação suficiente para definir se a aplicabilidade da reciclagem é viável em todas as etapas do projeto, ficando claro quão relevante é essa fase no processo de reabilitação de um pavimento, pois as características de cada projeto impõem particularidades únicas que

devem ser tratadas da melhor forma possível, sendo imprescindível um prévio conhecimento das características dessas especificações juntamente dos recursos disponíveis para saná-las.

4.1. Caracterização da via a reabilitar

Com o objetivo de comprovar a viabilidade da utilização da reciclagem como método construtivo, se faz necessário uma fase de estudos das principais características do pavimento a reabilitar. Este levantamento é determinado de forma a abordar aspectos que tratem das condicionantes econômicas, os impactos ambientais, aspectos logísticos, características geométricas da via, as solicitações do tráfego e as demais especificações de acordo com o as solicitações do projeto.

Segundo o manual de restauração de pavimentos (DNIT, 2006), a determinação das técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis como um método construtivo viável, entre as diversas alternativas convencionais de reabilitação, está diretamente vinculada com diversos fatores, entre os quais podem ser citados os seguintes:

- Condição do pavimento (inventário de danos no pavimento);
- Determinação das causas prováveis dos defeitos e patologias, baseados em estudos de laboratório e de campo;
- Histórico e projeto da construção da via;
- Histórico e projeto das intervenções e reabilitações da via;
- Análise da geometria da via (horizontal e vertical);
- Condição estrutural;
- Análise de desempenho da rodovia;
- Classe da rodovia;
- Volume de tráfego do local;
- Condições de remanejamento do tráfego;
- Fatores Ambientais.

Com o detalhamento desses aspectos do pavimento degradado, o projetista já terá um direcionamento quando a eficiência da técnica, sendo essencial observar se a via degradada apresenta heterogeneidades quanto à composição das camadas do pavimento, se as mesmas ocorrem de forma localizada ou apresentam grandes variações ao longo do segmento da pista. Pois o elevado número variações relacionado à disposição das camadas do pavimento, acaba por se tornar um grande contratempo, podendo em algumas situações inviabilizar a utilização das técnicas de reciclagem.

O elevado número de variações das camadas se traduz em grande variação dos materiais utilizados, o que acaba por implicar um aumento na demanda em estudos e ensaios com o objetivo de descobrir as reais condições e comportamento desses materiais. Isso acaba por elevar o número de processos construtivos, e conseqüentemente o número de formulações de misturas recicladas, impossibilitando totalmente a utilização do método como uma solução viável do ponto de vista econômico.

Dentro da fase de observação da via, na parte dos processos preliminares, é essencial avaliar os limites das técnicas quanto ao nível de deterioração do pavimento, pois para que os resultados sejam eficazes, é necessário que se tenha condições estruturais mínimas para se reabilitar o mesmo, sendo também importante avaliar a capacidade funcional dos equipamentos a utilizar. Principalmente no âmbito da profundidade máxima de trabalho que podem alcançar em suas utilizações, já se antecipando a existência de fendas profundas sobre a pista de rolamento, o que pode ser outro grande limitador para a utilização da reciclagem.

A definição do volume de tráfego juntamente com a classe da rodovia é um ponto de extrema relevância dentro a fase de planejamento do projeto, pois de acordo com esses dados é possível fazer projeções estatísticas do crescimento desse valor com base nas taxas de desenvolvimento das regiões próximas, e também fazer ajustes quanto ao tempo de execução da obra, em relação à importância do trecho e a possibilidade ou não de remanejamento de trânsito. O que acaba por auxiliar na definição dos resultados finais sobre o que se espera da via em face da reabilitação, quer seja ele em manter as condições iniciais de funcionamento ou agir de forma a aumentar a capacidade de utilização da mesma.

Como fica evidenciado no gráfico a seguir (Figura 4.1), um fator que também deve ser analisado juntamente com os pontos citados anteriormente, é o histórico do pavimento, quer seja ele em seu projeto inicial de construção da via quer também no histórico e projeto das intervenções e reabilitações já efetuadas, pois as características do estado do pavimento variam bruscamente de acordo com o tempo, por isso é essencial um prévio conhecimento sobre seu comportamento, de forma a determinar as melhores soluções para a reabilitação e garantir o nível de serviço esperado.

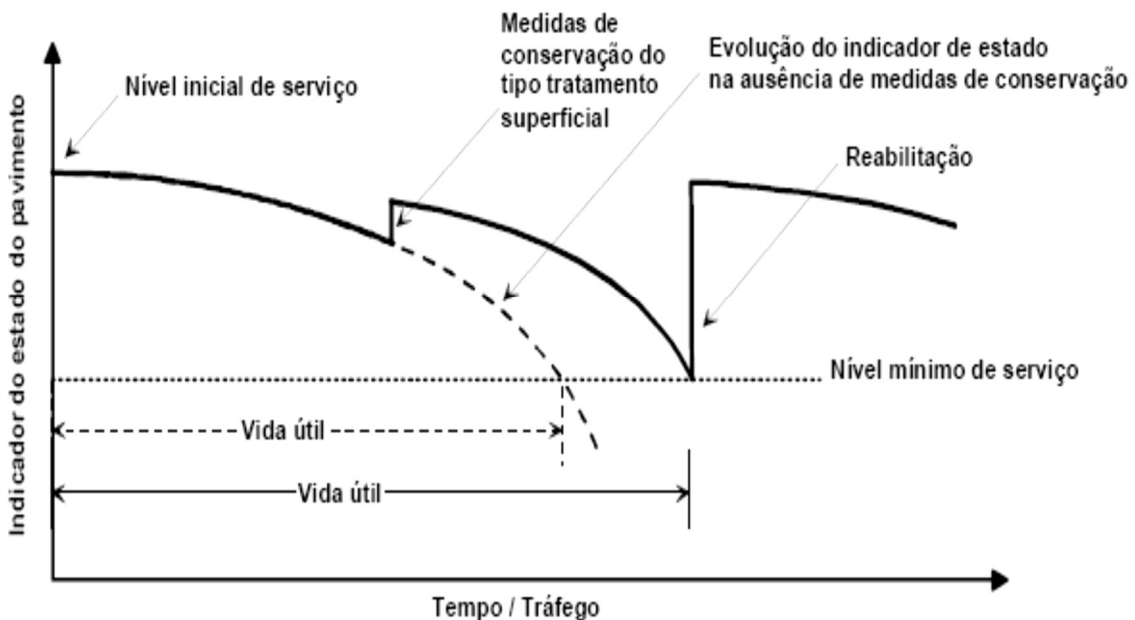


Figura 4.1 - Evolução do estado de um pavimento (PEREIRA & MIRANDA, 1999)

4.2. Caracterização dos materiais

Numa segunda etapa dos processos preliminares de um projeto de reciclagem, toda atenção é destinada à caracterização dos materiais que compõem as suas camadas. Como o principal objetivo construtivo da reciclagem é a reutilização desses elementos, é essencial uma completa observação do seu estado de qualidade, comportamento mecânico e suas principais características como um material a ser reutilizado no projeto.

Parte deste processo está diretamente ligada com a avaliação das características das vias, pois o recolhimento dos dados históricos sobre a estrada danificada mostra aos engenheiros responsáveis pela obra informações de grande relevância, como:

- Detalhamento sobre as seções do pavimento;
- Materiais utilizados;
- Informações sobre o projeto de mistura utilizado;
- Dados sobre drenagem.

De acordo com essas informações é possível determinar se há no pavimento degradado materiais suficientes em qualidade e em termos quantitativos, para uma possível intervenção por meio da reciclagem.

Com a intenção de se verificar o comportamento dos materiais, é necessário um número suficiente de amostras da via danificada, as mesmas devem ser colhidas de forma aleatória permitindo ao profissional responsável proceder aos ensaios necessários para sua caracterização. É primordial ficar atento a uma grande diferenciação dos elementos existentes, pois segundo (DNIT, 2006), *”A presença de materiais com muitas variações pode acarretar a seleção de subprojetos para análise e reciclagem diferenciada. O número excessivo de subprojetos pode tornar a reciclagem antieconômica, devido ao elevado número de ensaios para cada segmento”*.

As amostras coletadas dos materiais devem ser representativas em face de real condição do pavimento, sendo necessária a fresagem dos elementos das amostras da parte da pista que irá ser reciclada, pois o processo de fresagem da faixa de rolamento resulta em uma variação na curva granulométrica do revestimento, devido ao acréscimo de finos proveniente do processo, sendo necessário esse rigor, de forma a garantir a confiabilidade das amostras coletadas.

Quando se trata de pavimentos rodoviários flexíveis, na sua grande maior parte, a sua constituição se dá por agregados e aglutinantes, dessa forma pode-se fazer a sua caracterização de forma distinta, separando em grupos conforme feito nos subcapítulos à frente.

4.2.1. Agregados

Os agregados são materiais granulares, com forma e volume aleatórios e que não exerce atividade química em condições normais, ou seja, quimicamente estável. Dentro do campo da pavimentação o mesmo é recorrentemente utilizado, principalmente por conta de seu comportamento mecânico e também pelo seu custo relativamente reduzido. Sua resistência mecânica se dá pelo fato da sobreposição de vários agregados entre si, o que forma uma estrutura pétreo capaz de resistir aos esforços condicionados ao volume de tráfego do pavimento. Para a aplicação dentro de um projeto de pavimentação o agregado deve apresentar características adequadas de acordo com as especificações do projeto, para isso é extremamente importante conhecer a fundo o agregado que se irá utilizar, dentre as particularidades dos agregados pode-se citar como principais as seguintes:

- Origem e composição mineralógica;
- Modo de obtenção;
- Dimensão das partículas;
- Baridade;
- Massa volúmica.

Dentro de uma mistura betuminosa de pavimentação rodoviária a porcentagem de agregados varia em cerca de 90% a 95% do peso da mistura, o que equivale a cerca de 70% a 75% do volume total, ficando assim explícito quão relevante é o conhecimento do agregado que se irá utilizar (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008). Na reciclagem de pavimentos, o agregado é tratado com a mesma importância, sendo necessários inúmeros ensaios para definir o seu comportamento e características, pois de acordo com o resultado das reais condições em que se encontra o agregado, pode-se proceder a formulação da mistura e conseqüentemente fazer a dispensa das zonas do pavimento que não sejam adequadas para a reciclagem, ou seja, aquelas cujos materiais não possuem condições de ser reutilizados. De acordo com a figura na sequência (Figura 4.2) verifica-se a diferença existente entre vários tipos de agregados, demonstrando a heterogeneidade existente neste tipo de material.



Figura 4.2 – Diferentes tipos de agregados

Sendo assim, dentro da classificação dos agregados é necessário determinar suas características fundamentais, que nomeadamente são granulometria, resistência, forma e limpeza. Para determinar as características fundamentais do agregado, recorre-se aos seguintes ensaios (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008):

- **Granulometria**

Análise granulométrica (*NP EN 933-2*).

- **Resistência**

Ensaio Los Angeles (*NP EN 1097-2*);

Ensaio de polimento acelerado (*NP EN 1097-8*).

- **Forma**

Índice de lamelação ou achatamento (*NP EN 933-3*);

Índice de alongamento ou forma (*NP EN 933-4*).

- **Limpeza**

Ensaio de Equivalente de Areia (*NP EN 933-8*);

Valor de Azul Metileno (*NP EN 933-9*).

Os novos agregados a serem utilizados, em casos de correção da curva granulométrica ou complemento da nova formulação da via, devem compatíveis com a especificação da mistura desejada, onde os mesmos devem estar totalmente isentos de material orgânico, pois com o decorrer do tempo e a deterioração deste material, pode haver um possível comprometimento na sobreposição dos agregados afetando o comportamento estrutural da via. Se tratando da utilização de agregados recuperados, segundo (AZEVEDO & CARDOSO, 2003), se recorre ainda a mais ensaios para sua caracterização, sendo que se a porcentagem na reciclagem for inferior a 25% material betuminoso a reciclar a coleta de amostras deverá ser feita a cada 500 toneladas, e para porcentagens acima de 25% a cada 200 toneladas, o número de amostras a serem coletadas e de no mínimo cinco amostras, das quais deverão ser determinadas as características fundamentais, juntamente com a:

- Granulometria do material desagregado, (Segundo a NP EN 933-1);
- Granulometria dos agregados recuperados, (Segundo EN 12697-2).

Os valores obtidos nos ensaios, sejam eles para determinação das características fundamentais ou os que tratam sobre o agregado recuperado, devem seguir os índices estabelecidos no quadro abaixo (Quadro 4.1) de modo a ser definido como um potencial agregado a ser reutilizado no método construtivo de reciclagem de pavimentos flexíveis.

Ensaio corrente	Índice
<i>Dimensão máxima do Agregado</i>	80 mm
<i>Porcentagem mínima de material passado no peneiro de 4 mm</i>	30%
<i>Resistência a fragmentação - Coeficiente de Los Angeles, máximo</i>	40%
<i>Índice máximo de plasticidade</i>	15%
<i>Limite máximo de liquidez</i>	35%
<i>Equivalente de areia da fracção 0/2 mm, mínimo</i>	40% (1)
<i>Valor de azul metileno da fracção 0/2 mm, mínimo</i>	2,5% (1)
(1) - Os finos dos agregados não devem ser prejudiciais, devendo satisfazer pelo menos um dos dois critérios: Equivalente de areia ou azul metileno.	

Quadro 4.1- Características dos agregados a reciclar
(Adaptado AZEVEDO, 2009)

Na fase de execução da obra, após toda a conclusão do processo construtivo preliminar, e verificando se que em todos os segmentos do projeto a técnica de reciclagem se mostrou viável como um método construtivo, deve-se manter um controle de qualidade bastante rigoroso, de forma a garantir os resultados esperado nos estudos preliminares, desta forma em relação ao controle efetivo de qualidade dos agregados a serem reutilizados no pavimento, recomendam-se as frequências de ensaios de acordo com o quadro a seguir (Quadro 4.2):

Ensaio corrente	Frequência
Granulometria dos materiais a reciclar ou dos agregados de adição	1 por cada 1000 m ³ ou dia de trabalho
Equivalente de areia	1 por cada 1000 m ³ ou dia de trabalho
Valor de azul metileno	1 por cada 1000 m ³ ou dia de trabalho
Limites de liquidez e índice de plasticidade	1 por semana o sempre que altere a proveniência
Resistencia a fragmentação coeficiente de Los Angeles	1 por semana o sempre que altere a proveniência, ou em caso de duvida, num minimo de 3 resultados durante a empreitada.

Quadro 4.2 – Frequência mínima dos ensaios a realizar sobre os materiais a reciclar (Adaptado AZEVEDO, 2009)

4.2.2. Aglutinantes

Os aglutinantes são materiais que tem capacidade de aderir a outros materiais, sua utilização dentro da pavimentação asfáltica se dá pela sua alta capacidade de junção dos agregados pétreos, o que resulta na formação estrutural do pavimento, destinada a resistir os esforços impostos pelas cargas derivadas do volume do tráfego. A classificação inicial dos aglutinantes pode ser feita da seguinte forma:

- Aglutinantes asfálticos (Aglutinantes betuminosos)
- Aglutinantes Hidráulicos (Cimentos)

Na reciclagem de pavimentos flexíveis utiliza-se os aglutinantes betuminosos, podendo em algumas técnicas haver a utilização de aglutinantes hidráulicos, porém os mesmos ocorrem com menor frequência, sendo feita a caracterização do ligante na seção que descreve a respectiva técnica (Capítulo 6.1.3). De forma geral a vantagem dos materiais betuminosos se dá por conta dos mesmos serem materiais termoplásticos, uma característica que apresenta benefícios do ponto de vista construtivo, pois ao encontrar-se a uma temperatura elevada, perde o seu estado rígido e deforma-se, possibilitando uma melhor usabilidade deste material. É essencial salientar igualmente a viscosidade elevada à temperatura ambiente, particularidade também designada como viscosidade dinâmica ou consistência, definindo-se como a capacidade de um corpo para sofrer deformações permanentes sob a ação de uma sollicitação, sendo as tensões funções lineares da velocidade do escoamento.

Uma diferenciação existente dentro dos aglutinantes asfálticos se dá pela sua origem. Sendo eles de origem naturais como o asfalto e a rocha asfáltica, ou derivados de outros elementos como no caso do alcatrão e do betume asfálticos. *”Hoje em dia, praticamente só se usam produtos derivados da destilação do petróleo bruto, os betumes asfálticos, Outros como alcatrão ou asfalto, não tem sido usado em Portugal”*. (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008). A não utilização de outros ligantes betuminosos está diretamente ligada à disponibilidades desses elementos e também a fatores econômicos. Já a ampla utilização do betume se justifica pela suas características mecânicas, adesivas e impermeabilizantes, pois ao ser aquecido a sua capacidade termoplástica facilita o envolvimento com os agregados, e ao esfriar ocorre um aumento da sua viscosidade, resultando numa melhor ligação com os materiais construtivos, o que é essencial face aos esforços que agem sobre o pavimento.

A produção do betume asfáltico ocorre por meio de refinarias, através de um método de destilação do crude do petróleo, da qual a parte líquida derivada deste processo da origem ao material aglutinante que será introduzido no pavimento rodoviário. No que se refere às características do betume asfáltico obtidos por destilação direta, recomenda-se que as mesmas devam respeitar a especificação LNEC E80 (Quadro 4.3). A determinação dos índices do LNEC são obtidos através da aplicação de uma série de ensaios, descritos e normalizados no quadro em sequência (Quadro 4.4).

Propriedade			10/20	20/30	35/50	50/70	70/ 100	100/ 150	160/ 220	220/ 330
Penetração a 25°C	Mín.		10	20	35	50	70	100	160	220
	Máx.		20	30	50	70	100	150	220	330
Temperatura de amolecimento (°C)	Mín.		63	55	50	46	43	39	35	30
	Máx.		76	63	58	54	51	47	43	38
Viscosidade cinemática a 135°C (cSt)	Mín.		1000	530	370	295	230	175	135	100
Solubilidade em tolueno ou xileno (%)	Mín.		99	99	99	99	99	99	99	99
Temperatura de inflamação (°C)	Mín.		250	240	240	230	230	230	220	220
Resistência ao endurecimento (RTFOT ou TFOT)	Varição de massa (%)	Máx.	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	1,0	1,0
	Penetração residual (%)	Mín.	60	55	53	50	46	43	37	35
	Temp. amolecimento (°C)	Mín.	65	57	52	48	45	41	37	32
	Aumento temp. amolec. (°C)	Máx.	8	10	11	11	11	12	12	12

Quadro 4.3 - Propriedades e exigências de conformidade do betume (LNEC, 1997)

Propriedade		Norma de ensaio ASTM	Norma de ensaio europeia
Penetração a 25°C (10 ⁻¹ mm)		D 5 (ASTM, 1997-a)	EN 1426 (CEN, 1999-b)
Temperatura de amolecimento (°C)		D 36 (ASTM, 1995)	EN1427 (CEN, 1999-c)
Viscosidade cinemática a 135°C (cSt)		D 2170 (ASTM, 2001-a)	EN 12595 (CEN, 1999-d)
Solubilidade em tolueno ou xileno (%)		D 2042 (ASTM, 2001-b)	EN 12592 (CEN, 1999-e)
Temperatura de inflamação (°C)		D 92 (ASTM, 2002-a)	EN 2592 (CEN, 2001)
Resistência ao endurecimento (RTFOT ou TFOT)	Varição de massa (%)	D 2872 (ASTM, 1997-b) (método RTFOT) ou	EN 12607-1 (CEN, 1999-f) (método RTFOT) ou
	Penetração residual (%)		EN 12607-2 (CEN, 1999-g) (método TFOT)
	Temperatura de amolecimento (°C)	D 1754 (ASTM, 1997-c) (método TFOT)	
	Aumento da temp. amolecimento (°C)		

Quadro 4.4 - Métodos de ensaio dos betumes asfálticos (LNEC, 1997)

Quando se trata da caracterização dos aglutinantes presentes no pavimento a reciclar é necessário um pouco mais de detalhamento, (AZEVEDO & CARDOSO, 2003) sendo indispensável determinar:

- Porcentagem em betume;
- Porcentagem de materiais estranhos;
- Penetração, temperatura de anel e bola e/ou viscosidade do material recuperado;
- Quantidade de betume modificado e tipo do modificador.

A porcentagem de materiais estranhos deve ser inferior a 1%, e entende-se por materiais estranhos, outros materiais que não misturas betuminosas, como betão de cimento, mastique betuminoso, materiais de demolição, etc.

Segundo (AZEVEDO & CARDOSO, 2003), o ligante betuminoso recuperado, proveniente do material fresado deverá ser capaz de misturar-se de forma homogênea com o novo ligante a ser utilizado na composição da mistura reciclada, de forma a obter um novo produto de acordo com as solicitações do projetista. O betume recuperado não deve apresentar um valor médio inferior a 15×10^{-1} mm em cinco determinações de penetração a 25° C segundo a norma EM 1426, e nem um valor individual menor do que 15×10^{-1} mm. Para a determinação da quantidade de betume novo a se incorporar na composição da mistura reciclada deve se utilizar a seguinte expressão:

$$\log(\text{PenM}) = \text{A} * \log(\text{P1}) + \text{B} * \log(\text{P2}) \quad (4.1)$$

Onde:

PenM → Penetração calculada do betume na mistura betuminosa reciclada

P1 → Penetração do betume recuperado

P2 → Penetração do betume novo a adicionar

A e B → Proporção em massa do betume recuperado e do betume novo a adicionar, sendo que a soma das duas unidades tem que corresponder a massa total dos ligantes da mistura.

A quantidade total de ligantes betuminosos a ser utilizado (aglutinante recuperado mais aglutinante novo), não deve ser menor do que 5% da massa total dos agregados a seco da mistura reciclada (filer, agregados de adição e agregados recuperados) em camadas intermediárias, e de 4.5% em camadas de base. Indica-se que a porcentagem de ligantes deva ser no mínimo de 60% da porcentagem total de ligante do material derivado da reciclagem. O valor do ensaio de penetração do betume resultante da mistura betuminosa reciclada deve andar entre valores de 35×10^{-1} mm a 50×10^{-1} mm, de modo a garantir as propriedades mecânicas necessárias e comprovar a viabilidade da reutilização do betume do pavimento degradado, podendo também por vezes serem adicionados agentes rejuvenescedores de forma a recuperar características perdidas do betume por conta do envelhecimento e desgaste por fatores climáticos.

4.3. Determinação da taxa de reciclagem

A definição da taxa de reciclagem determina a proporção de material fresado usado no fabrico de uma mistura betuminosa reciclada. Sua utilização acaba por auxiliar na determinação da viabilidade da reciclagem e auxilia na determinação do melhor ambiente e técnica construtiva. *“A taxa de reciclagem (TR), por vezes designada de taxa de incorporação ou porcentagem de reciclagem, representa então a proporção de material que se recicla ou, o que é o mesmo, a porcentagem de material fresado na mistura betuminosa reciclada”*. (BAPTISTA, 2006)

De acordo com (BAPTISTA, 2006), a (TR) representa a taxa de reciclagem expressa em porcentagem, seu valor corresponde a relação entre a massa do material fresado (mt F) e a massa total da mistura reciclada (mt R).

$$TR = \frac{mt F}{mt R} \quad (4.1)$$

Também é comum definir a taxa de reciclagem de agregado (TR a), que relaciona a massa de agregado do material fresado (ma F), e a massa de agregado da mistura reciclada (ma R), juntamente com a taxa de reciclagem de betume (TR b), a mesma refere-se a proporção entre a massa de betume recuperado (mb F) e a massa de betume total da mistura reciclada (mb R).

$$TR a = \frac{ma F}{ma R} \quad (4.2)$$

$$TR b = \frac{mb F}{mb R} \quad (4.3)$$

Através dessa determinação juntamente com caracterização dos materiais e da via, já é possível comprovar a viabilidade ou não da reciclagem. Sendo que em caso positivo da utilização, deve se dar prosseguimento na elaboração do projeto, devendo o mesmo especificar zonas do pavimento onde não pode ser efetuada a reciclagem, devido a questões de deficiência do material disponível em relação às solicitações de projeto. Neste caso o material que não foi reutilizado deverá ser encaminhado para vazadouro ou levado para usinas betuminosas onde pode ser integrado a um estoque de materiais fresados existente.

O projeto do novo pavimento deve também definir as profundidades de reciclagem, juntamente com a constituição e espessura das novas camadas do pavimento reabilitado, podendo em seguida ser definido o ambiente da reciclagem juntamente com a melhor técnica construtiva para a execução do projeto.

5. AMBIENTES DE RECICLAGEM

De acordo com as informações expostas nos capítulos anteriores, sobre os processos que antecipam a determinação da técnica de reciclagem a se utilizar, observa-se que um fator de grande relevância para essa escolha é o ambiente de reciclagem a ser escolhido pelo projetista, pois a determinação desse local, de acordo com a definição do responsável pela obra, acarreta em estudo sistemático sobre metodologias e análises referentes ao transporte de matérias da obra para as usinas de betumes.

O aspecto mais significativo está relacionado como o transporte de materiais entre a obra e central, e os correspondentes impactes, quer para utentes (perturbação das condições de circulação), quer para os pavimentos existentes (maior agressividade decorrente do tráfego pesado de obra), assim como nível ambiental ruído e poluição atmosférica). (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008)

Sendo assim é necessária uma reflexão sobre o custo-benefício de cada escolha, sendo que em determinadas situações, as próprias especificações de projeto irão guiar o melhor ambiente para a execução da reciclagem. Por muitos especialistas a determinação da reciclagem no local (*In Situ*) é definida como uma melhor opção, devido ao fato de não haver necessidade de transporte de materiais, resultando em um menor investimento financeiro e economia de tempo de execução do projeto, isso sem levar em conta uma maior proximidade com os aspectos da sustentabilidade que visa à eficiência com o menor impacto possível.

A determinação da reciclagem no próprio local está diretamente ligada a algumas variáveis que fogem ao controle do engenheiro responsável pelo projeto. A falta de equipamentos específicos para reciclagem no local, condicionantes climáticas e econômicas juntamente com a necessidade de um maior rigor na qualidade e fiabilidade da produção das misturas betuminosas, são fatores totalmente relevantes que acabam por influenciar essa escolha.

Para a execução de uma reciclagem no local será necessário um controle de qualidade mais rigoroso, pois a mesma se trata de uma concepção de uma mistura betuminosa no próprio local da via, resultando em uma maior dificuldade na formulação da mesma. Outros fatores relacionados com a dificuldade deste ambiente são as

interferências climáticas que influenciam no desenvolvimento e utilização das misturas recicladas, por se tratar de um ambiente aberto e desprotegido contra intempéries. Isso acaba por comprometer ou dificultar o nível de qualidade de execução do projeto, desenvolvendo a necessidade da criação de trechos experimentais de pavimento, para um melhor ajuste da formulação e análise do comportamento da mistura.

Através destes impasses observa-se como é importante um prévio estudo da região dentro da fase dos processos de reabilitação, que acabam por resultar na determinação do ambiente de reciclagem. Após o levantamento de todas as informações relevantes para o projeto, pode-se colocar em prática a definição do melhor ambiente de reciclagem a ser escolhido, e iniciar os processos da reabilitação do pavimento degradado. Deve-se levar em conta neste levantamento as principais características que justificam a utilização da reciclagem de pavimentos que são a sustentabilidade, eficácia técnica e econômica.

De acordo com (PEREIRA & MIRANDA, 1999),” *Através de uma melhoria dos processos e dos equipamentos, será possível tornar estas técnicas mais econômicas, aumentando o interesse pela sua utilização*”. Levando em conta a larga utilização da reciclagem em vários países, acredita-se que o custo da produção de misturas em centrais tenha uma redução no seu custo, o que irá justificar sua maior utilização no futuro, haja vista que os seus critérios de controle de qualidade são superiores do que na produção *In Situ*.

Através da (Figura 5.1) observa-se o fluxograma das tomadas de decisões, de forma a definir o melhor ambiente para a produção das misturas betuminosas a se utilizar, resultando posteriormente na decisão de qual técnica de reciclagem de pavimento que se irá empregar. De acordo com o fluxo de tomada de decisões, fica claro que todas as ações estão interligadas entre si, deste o início da obra, com a fase de estudos do projeto, até a fase final da aplicação da técnica de reabilitação. Fica assim evidenciado a importância da análise das características da via na fase dos processos de construção, que foram tratados no capítulo anterior, pois os frutos deste estudo acabam por determinar os segmentos futuros do projeto, refletindo no seu tempo de execução e custo final.

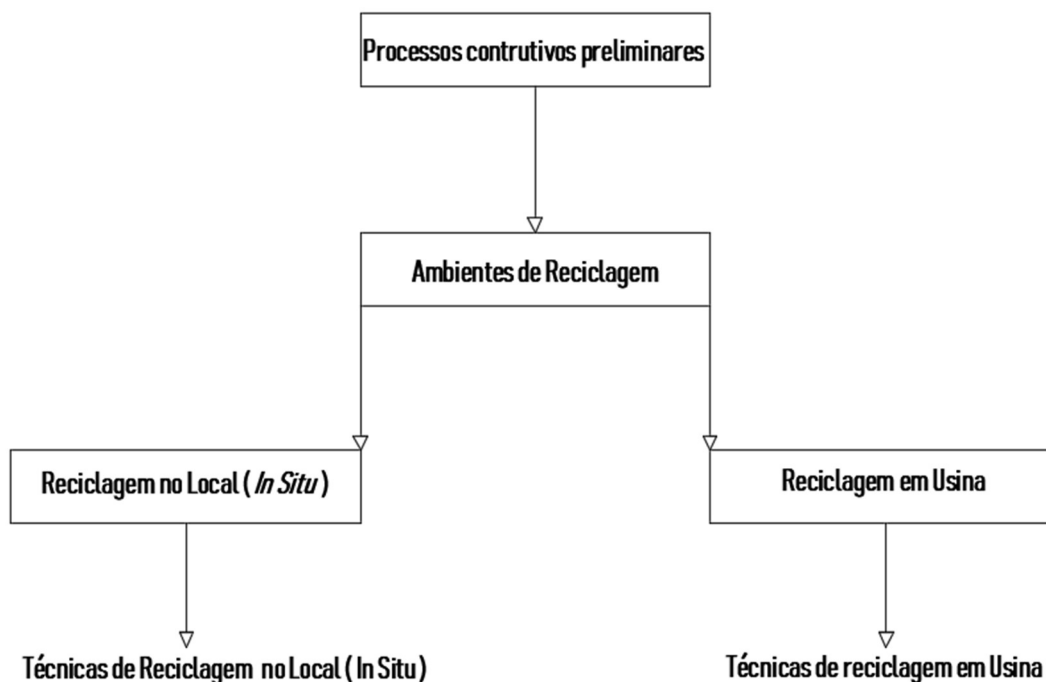


Figura 5.1 – Fluxo de tomada de decisões quando a técnica de reciclagem

5.1. Reciclagem no local (In Situ)

O princípio mais significativo dentro a escolha deste ambiente de reciclagem, está diretamente ligada ao aspecto de não ser necessário o transporte de materiais para as usinas de betumes. Essa característica é um fator determinante para o uso dessa alternativa, a imposição de perturbação nas condições de circulação, corresponde a um grande impacto negativo para os usuários da via, o que acaba por contrariar em parte o princípio da aplicabilidade da reciclagem de pavimentos, que é o desenvolvimento com o menor impacto possível quer seja ele a nível ambiental ou simplesmente em nível de circulação para os utentes.

Com a utilização da reciclagem *In Situ*, acaba-se por amenizar os efeitos nocivos em outros pavimentos existentes, a necessidade de um fluxo de matérias fresados da obra para as usinas, e vice-versa, impõe uma maior agressividade no pavimento por conta do tráfego pesado de obra, o que acaba por resultar em fator catalisador da

degradação dos pavimentos existente. Também pode ser levado em conta a diminuição significativa de danos a nível ambiental como uma menor poluição sonora e atmosférica.

Outro elemento a ser considerado é a velocidade na execução da reabilitação, na maior parte das vezes, a reciclagem da via danificada ocorre em uma única passagem de um trem de equipamentos, denominado usualmente como *comboio de reciclagem*, essa particularidade permite atuar de forma isolada em determinadas vias ou bermas sem comprometer o funcionamento total da faixa de rolamento, e podendo também por vezes manter a cota original do pavimento, segundo (PEREIRA & MIRANDA, 1999) *”Está é uma das vantagens, a de manter a cota do pavimento, sendo por isso usada frequentemente em faixas largas com várias vias, em que apenas a via de circulação de pesados se encontra degradada, não impedindo a normal circulação de veículos”*.

Em termos práticos, a reciclagem no local, consiste basicamente em fresar o pavimento danificado a dimensões predeterminadas de acordo com as especificações do projeto e heterogeneidade granulométrica do pavimento, com o intuito de no mesmo local proceder a concepção da mistura betuminosa reciclada a se utilizar na reabilitação do pavimento existente, aplicando-se um ou mais ligantes, juntamente com introdução de agregados novos para as devidas correções que se fazem necessárias no projeto da mistura. Logo em seguida a resultante da mistura do material fresado com os novos materiais, deve ser aplicada no pavimento fresado e compactado de forma a garantir a cota do pavimento desejado.

Na figura a seguir (Figura 5.2) é ilustrado o funcionamento da reciclagem no local, onde ocorre a fresagem do pavimento danificado juntamente com a aplicação do ligante (neste caso espuma de betume), e posteriormente procedendo a mistura do material e distribuindo sobre o pavimento, na qual deverá ser compactado por outros equipamentos em sequência.

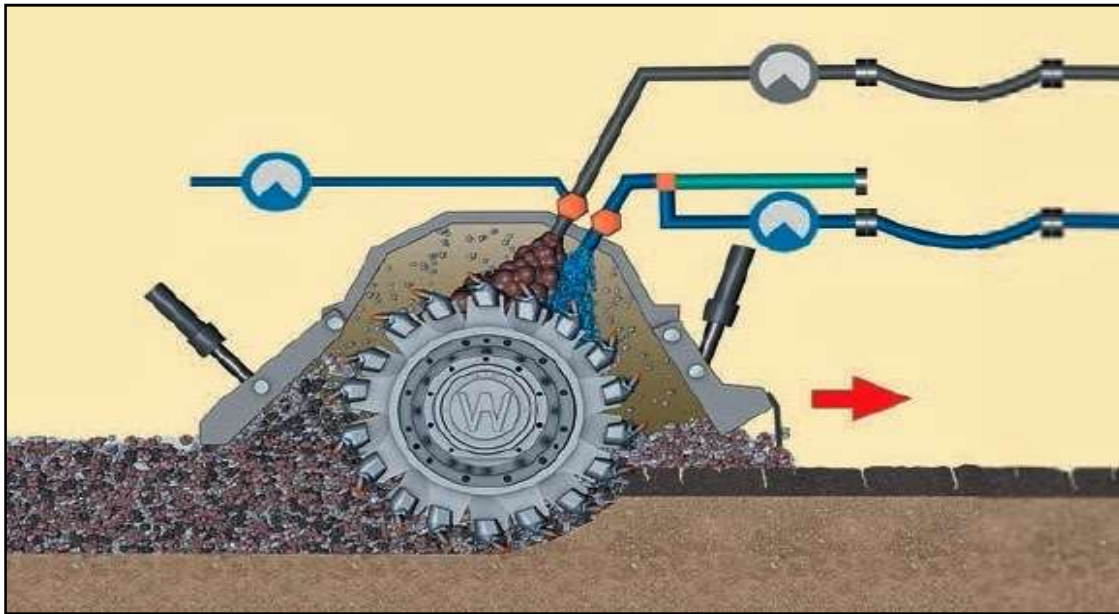


Figura 5.2 - Reciclagem *In situ* (adaptado de WIRTGEN, 2004)

Mas antes da tomada de decisão quando ao lugar de reciclagem, deve se avaliar as vantagens e desvantagens de cada tipo de escolha. Dentro as vantagens podemos destacar as seguintes características (MARTINHO, 2004):

- Em alguns casos terá menores consumos energéticos;
- Provocará menor ruído e menor poluição atmosférica em algumas técnicas;
- O tempo de execução do processo menor;
- O investimento total em equipamentos e inferior ao processo em usinas;
- Alguns processos construtivos serão mais econômicos;
- Aproveita na integra todos os materiais existentes no pavimento.

Entretanto, apesar de todas as vantagens, a reciclagem no local apresenta algumas desvantagens, embora algumas possam ser atenuadas ou compensadas, sendo de acordo (MARTINHO, 2004) as seguintes:

- O rigor no tratamento não pode ser idêntico ao longo de toda obra;
- A heterogeneidade das camadas prejudica o rigor das fórmulas de trabalho;
- As condições locais de execução podem afetar a qualidade do trabalho;

- Este processo está mais dependente das condições meteorológicas;
- As interferências com o tráfego poderão ser maiores em alguns casos;
- Alguns equipamentos mais complexos estão sujeitos a avarias no local de obra, sendo o acesso a oficinas mais lento.

A temperatura que é realizada a reciclagem (a frio ou a quente) depende do tipo de ligante a ser escolhido para a formulação da mistura a se utilizar. Em Portugal, na maior parte das obras de reabilitação de pavimentos degradados por meio da reciclagem *In Situ* utiliza-se a reciclagem a frio, pois as técnicas a quente apresentam maiores desvantagens, segundo (PEREIRA & MIRANDA, 1999) *“a desvantagem dessa técnica está relacionada com o seu custo elevado, em comparação com outras técnicas concorrentes, além da produção de poluição”*. Sendo assim necessária uma avaliação mais detalhada quantas as suas vantagens.

Com a intenção de se ilustrar melhor a distinção entre os métodos de reciclagem *in situ* a frio e quente, apresenta-se a seguir imagens (Figura 5.3 e 5.4) de modelos de equipamentos utilizados na reciclagem de pavimentos no local.



Figura 5.3 - Máquina recicladora a frio *In Situ* (WIRTGEN 2200 CR)



Figura 5.4 – Central Móvel de reciclagem a quente *In Situ* (Adaptado EAPA, 1998)

5.2. Reciclagem em usinas

Na reciclagem em usinas a matéria-prima procedente da fresagem do pavimento deteriorado é encaminhado para as usinas de produção de misturas betuminosas. As produções de misturas recicladas exigem algumas modificações nos processos de fabricação de misturas em usinas convencionais, mas que são de fácil adaptação, garantindo a viabilidade da escolha desde local de reciclagem de pavimentos.

A principal desvantagem ligada a esse local de reciclagem é o custo adicional de transporte, seja ele da obra de reabilitação para a usina e da usina retornando para obra ou para um novo projeto de reestruturação de pavimento. Custos esses, que podem ser minorados levando em conta a qualidade superior do produto resultante deste processo, segundo (PEREIRA & MIRANDA, 1999) “*A qualidade das misturas realizadas em centrais com os materiais reciclados deve ser comparável a das misturas realizadas com materiais novos.*”

Isso ocorre devido ao fato de em um ambiente industrial haver uma maior facilidade na recepção e gerenciamento dos materiais provenientes da fressagem de pavimentos danificados, além de possuir em apenas um único local materiais corretivos diversificados, desde ligantes e estabilizantes químicos para as misturas como também agregados de diversas dimensões utilizados com o intuito de correção da curva granulométrica do subproduto da reciclagem.

Do ponto de vista da complexidade do projeto, e do nível de gravidade dos estragos do pavimento, pode-se definir a reciclagem em usinas como uma melhor opção, devido ao nível de confiabilidade transmitido por esse local de produção, além da característica de que a produção não é afetada pelas condições locais de execução nem por condições climáticas por se tratar de um ambiente fechado, o que confere a essa escolha a possibilidade de execução e produção do começo ao fim com os mesmos critérios de controle de qualidade.

Atualmente existem dois tipos de funcionamento de usinas de betumes, as centrais contínuas e as centrais descontínuas. Nas centrais de tambor secador misturador, que é uma denominação utilizada para as centrais contínuas, o processo de secagem e mistura dos materiais provenientes da fresagem junto com os novos agregados ocorrem em um mesmo local, diferentes das centrais descontínuas onde a secagem dos materiais que irão compor a mistura reciclada ocorre em diferentes lugares, posteriormente ambos são destinados para uma unidade onde acontece a mistura dos mesmos, que usualmente é identificado como misturador.

A utilização de centrais contínuas permite um aproveitamento de até 50% do material da fresado, já nas centrais descontínuas a taxa pode chegar aos 70% dependendo de acordo com o tipo de central escolhida (CUNHA, 2010). Isso demonstra que as características da usina onde será feita a produção da mistura betuminosa influencia fortemente na determinação da taxa de utilização dos materiais fresados. À frente serão expostos os tipos de centrais e seus respectivos modos de funcionamentos.

5.2.1. Centrais descontínuas

Nas centrais descontínuas os métodos de reciclagem se dão por quatro diferentes formas, pelo método a frio, quente, método *recyclelean* (reciclagem limpa) e central de torre. Inicialmente se estabelece que antes de qualquer procedimento, que os materiais oriundos da fragmentação do pavimento a reciclar ou proveniente de depósitos na usina devem ser britados e crivados de acordo com as necessidades do projeto de mistura que

se deseja. Somente após isso esses materiais estarão prontos para a utilização na concepção da mistura betuminosa reciclada.

Pelo método a frio, a introdução das misturas betuminosas a reciclar pode ocorrer de duas formas, uma delas ocorre pela sua introdução junto à descarga do secador para o elevador de agregados quentes, onde ocorre o aquecimento da mistura antes de entrar para o misturador devido ao contato com os novos agregados que saem superaquecidos do secador, ou pela sua introdução diretamente no misturador onde haverá a incorporação dos demais ligantes, de acordo com as especificações do projetista (Figura 5.5).

É importante evitar aquecimentos excessivos dos novos constituintes adicionados. Os métodos a frio implicam percentagens de reciclagem de 10 a 30%, dependendo do teor em água dos materiais a reciclar, da qualidade da mistura betuminosa fresada, em relação à especificação imposta para a nova mistura betuminosa, e das limitações técnicas do processo em virtude das temperaturas máximas permitidas. (AZEVEDO & CARDOSO, 2003)

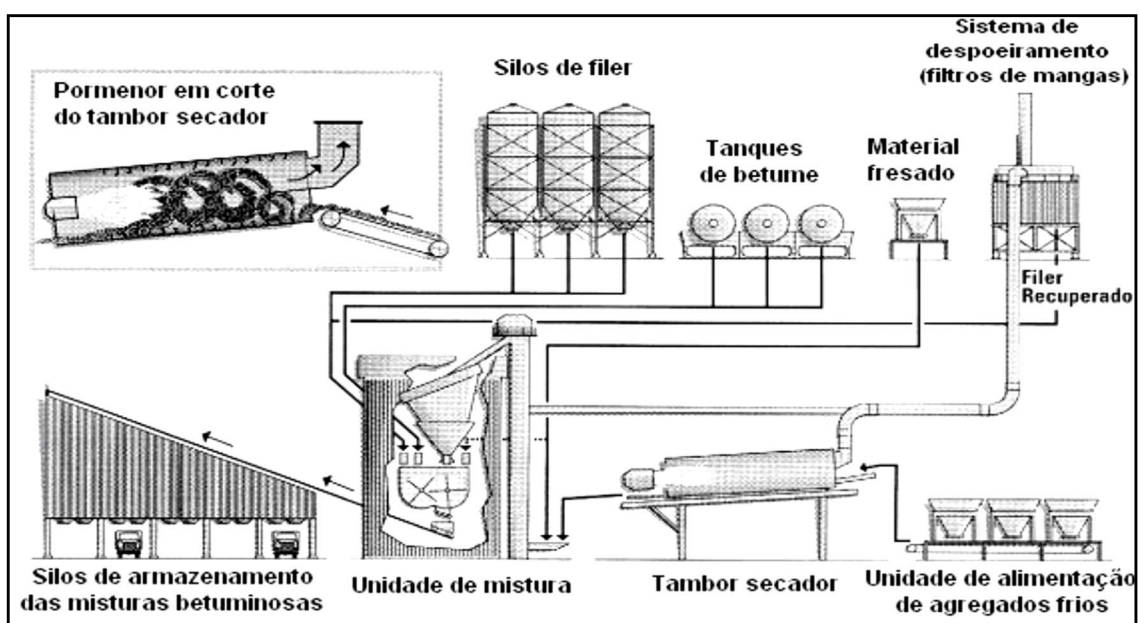


Figura 5.5 – Esquema de funcionamento de central betuminosa descontínua com incorporação de material fresado a frio (EAPA, 1998)

Através do método a quente, o material fresado a reciclar necessita ser aquecido (Figura 5.6), usualmente este processo é feito utilizando um secador auxiliar, o mesmo é

instalado de forma paralela ao secador principal. Este secador auxiliar denominado de tambor *tandem*, é o mesmo tem sua utilização voltada totalmente para o aquecimento do material fresado a utilizar, os agregados novos a utilizar são aquecidos no tambor principal, onde depois irá ser misturados com os demais elementos da mistura. ”As porcentagens usuais de reciclagem no método a quente são de 30 a 70%. O limite percentual superior é determinado pelas exigências especificadas pela mistura betuminosa em relação às propriedades da mistura betuminosa antiga a reciclar.” (AZEVEDO & CARDOSO, 2003)

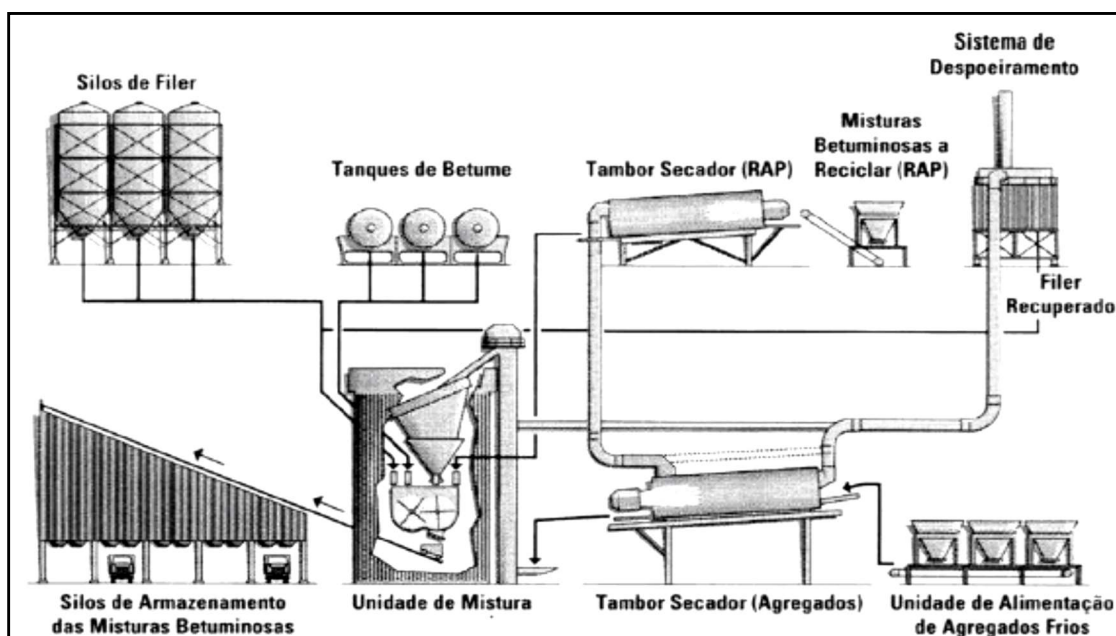


Figura 5.6 – Esquema de funcionamento de uma central betuminosa descontínua com incorporação do material fresado a quente (EAPA, 1998)

Existe ainda outra metodologia de reciclagem pela central descontínuas através do método Recyclean (Reciclagem limpa). “Este método permite taxas de reciclagem de até 35%” (AZEVEDO & CARDOSO, 2003), sendo que os agregados novos a ser inseridos na mistura são introduzidos no mesmo tambor com a matéria proveniente da fresagem, mas a disposição dos mesmos é feita em zonas diferentes do tambor secador. A introdução do agregado novo é feita pela parte frontal do tambor secado, sendo o material fresado e colocado em uma seção onde ficará atrás das chamas, garantindo que

este material não sofra sobreaquecimento (Figura 5.7). Pois "a exposição direta a chama pode produzir poluição do ar, bem como um endurecimento adicional do asfalto (Betume) remanescente no revestimento removido" (DNIT, 2006).

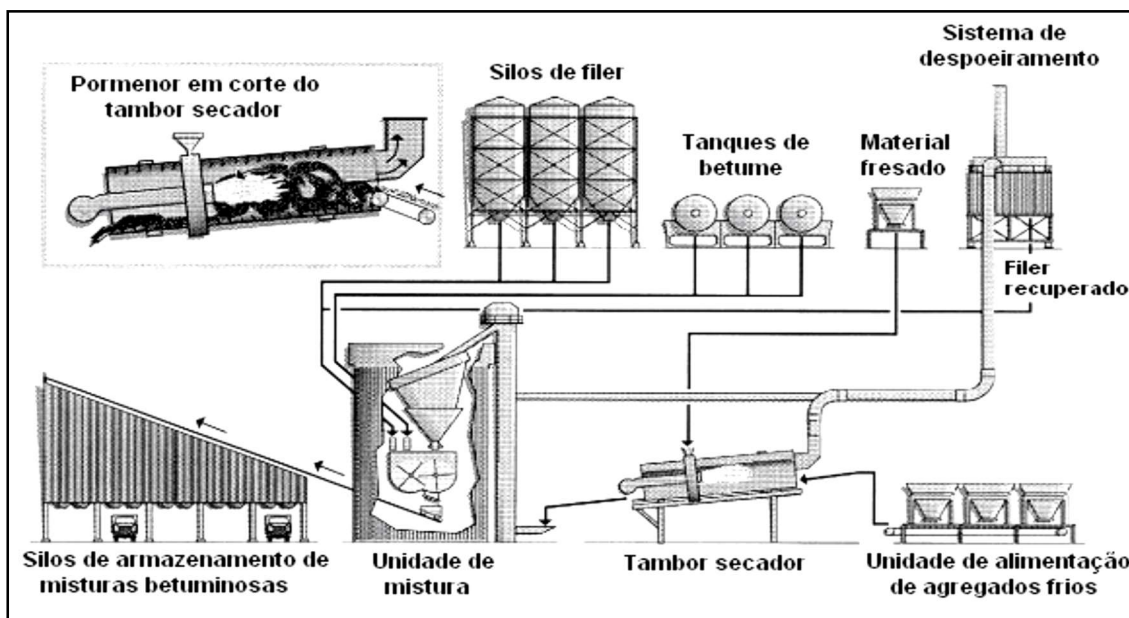


Figura 5.7 – Esquema de funcionamento de central betuminosa descontínua com incorporação de material fresado pelo método *Recyclean* (EAPA, 1998)

Dentro dos métodos das centrais descontínuas existe uma última metodologia a ser aplicada, denominado como central de torre (Figura 1.8), seu princípio consiste em um prévio armazenamento de agregados aquecidos, (AZEVEDO & CARDOSO, 2003) o que torna a parte da secagem uma parte distinta do processo. Os agregados previamente aquecidos nos secadores, em vez de irem para os misturadores são transferidos para silos aquecidos apropriados, que estão situados por cima do misturador, os mesmos são separados de acordo com sua fração granulométrica. Quando certa fórmula é escolhida, os agregados são enviados para as básculas e são posteriormente dirigidos para o misturador. Esta metodologia especial de central permite um fornecimento rápido de misturas betuminosas de formulações diferentes, passando rapidamente de um tipo de mistura a outro.

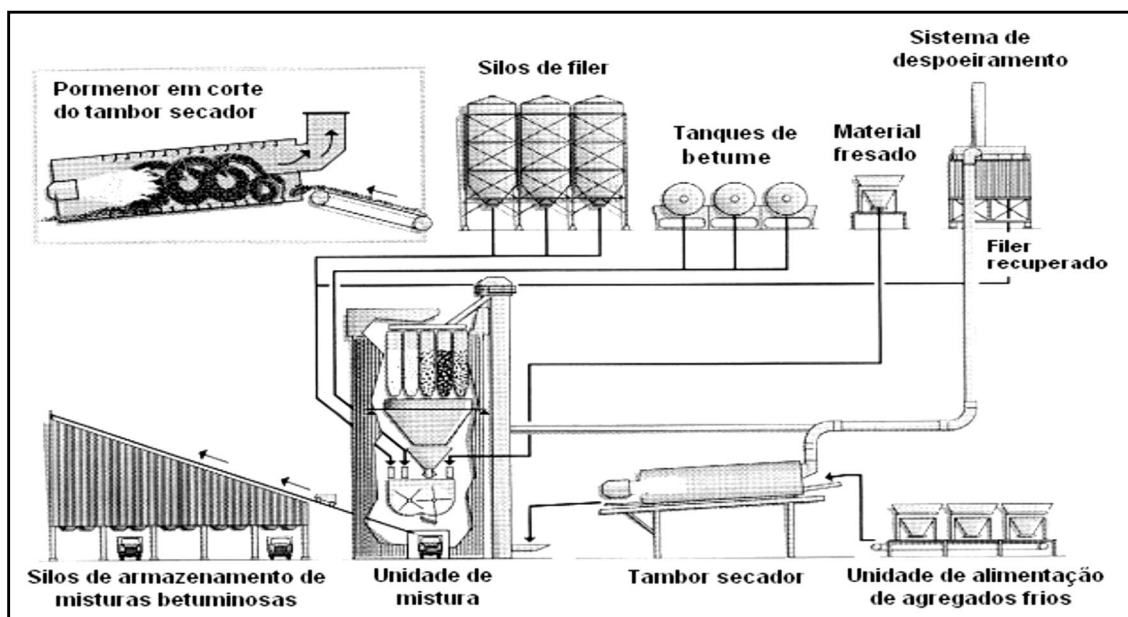


Figura 5.8 – Esquema de funcionamento de central de torre com incorporação de material fresado a frio (EAPA, 1998)

5.2.2. Centrais contínuas

Na utilização de centrais contínuas podem-se destacar os três métodos mais comuns de aquecimento da mistura a reciclar dentro do tambor secador, que são por chama direta, por chama indireta e pelo contato com agregados sobreaquecidos. Atualmente, as usinas de reciclagem de betume utilizam com maior frequência a metodologia de aquecimento por chama direta e por contato com agregados sobreaquecidos.

Dentro das metodologias das centrais contínuas existem três formas de fabricação da mistura reciclada, sendo a central com tambor de fluxo paralelo, central com tambor duplo e central com tambor de fluxo contracorrente. De acordo com a (Figura 5.9) fica representado o esquema genérico de funcionamento de uma central contínua. Destacam-se as diferentes metodologias de utilização, sendo a central com fluxo paralelo (Figura 5.10) denominada assim por conta do fluxo dos gases de combustão e dos agregados serem os mesmos.

Tal método tem seu funcionamento através da seguinte forma, após o prévio tratamento do material fresado de forma que o mesmo tenha as dimensões necessárias para o projeto de mistura, os mesmos são inseridos na parte central do tambor secador misturador denominado de alimentação separada, dessa forma o aquecimento do material a reciclar se dá pelo contato com os novos agregados sobreaquecidos que foram introduzidos na parte frontal do tambor secador misturador, e também pelo contato com os gases da combustão liberados dentro do tambor.

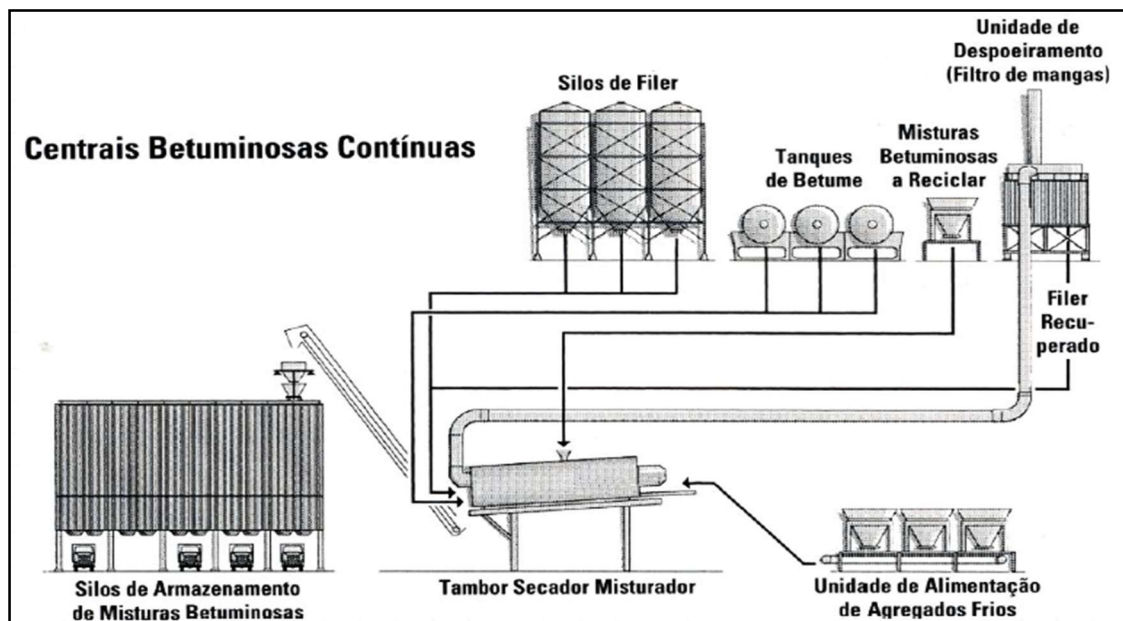


Figura 5.9 – Esquema genérico de funcionamento de uma central betuminosa contínua (adaptado de EAPA, 1998)

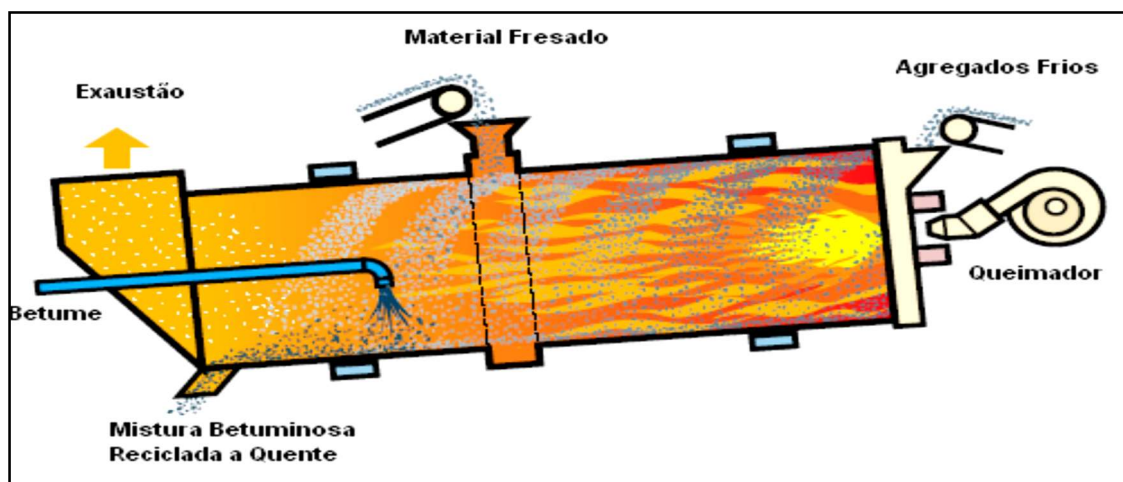


Figura 5.10 – Esquema do tambor secador misturador em central contínua de fluxos paralelos (BAPTISTA, 2006)

Com a utilização do tambor secador misturador duplo (Figura 5.11), o sistema equivale num tambor de fluxo contracorrente, envolvido por um tambor exterior fixo. Os materiais a reciclar são introduzidos no tambor exterior, diferente dos novos agregados que são inseridos pelo tambor interno onde serão sobreaquecidos (AZEVEDO & CARDOSO, 2003). Logo após o aquecimento os mesmos caem nos tambores exteriores por meio de aberturas no final do tambor interno, e seguem em direção contrária ao fluxo da chama, no espaço compreendido entre os dois tambores, onde ocorre a misturas dos materiais a reciclar juntamente com a incorporação dos novos ligantes e agregados por meio de pás de forno montadas na parede exterior do tambor interior.

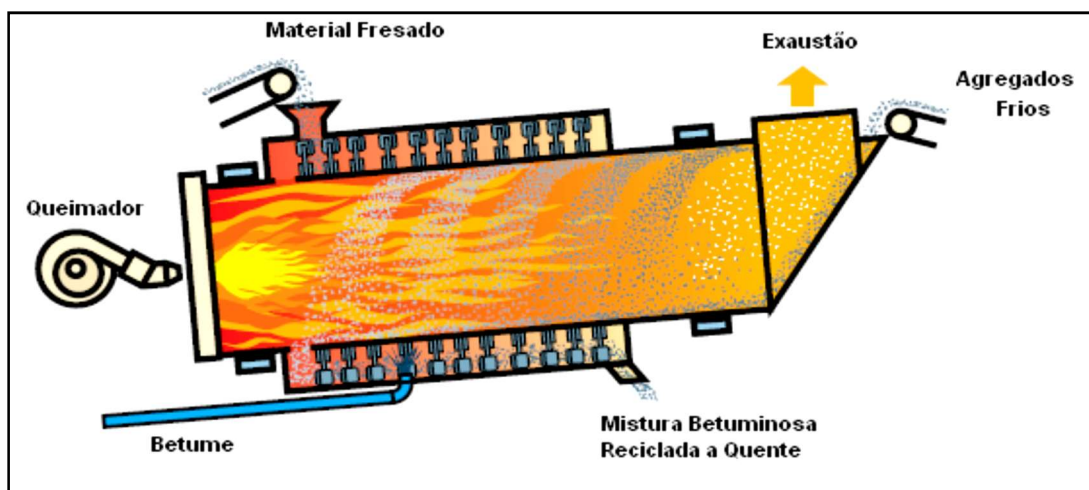


Figura 5.11 – Esquema do tambor secador misturador de central contínua de tambor duplo (BAPTISTA, 2006)

Já na solução com o tambor secador misturador de fluxo contra corrente representado na figura a seguir (Figura 5.12), o fluxo de gases de combustão e das chamas é oposto ao fluxo de entrada dos novos agregados. A localização do queimador fica à frente da zona de introdução do material fresado, garantindo assim que não haja contato direto desse material com a chama, ficando o aquecimento desde feito somente pelos agregados novos que foram sobreaquecidos. De acordo com (AZEVEDO & CARDOSO, 2003), “o princípio de fluxos opostos permite reduzir a temperatura dos gases quentes e melhora o desempenho do ponto de vista ambiental, através de um aquecimento menos intenso das misturas betuminosas recicladas”.

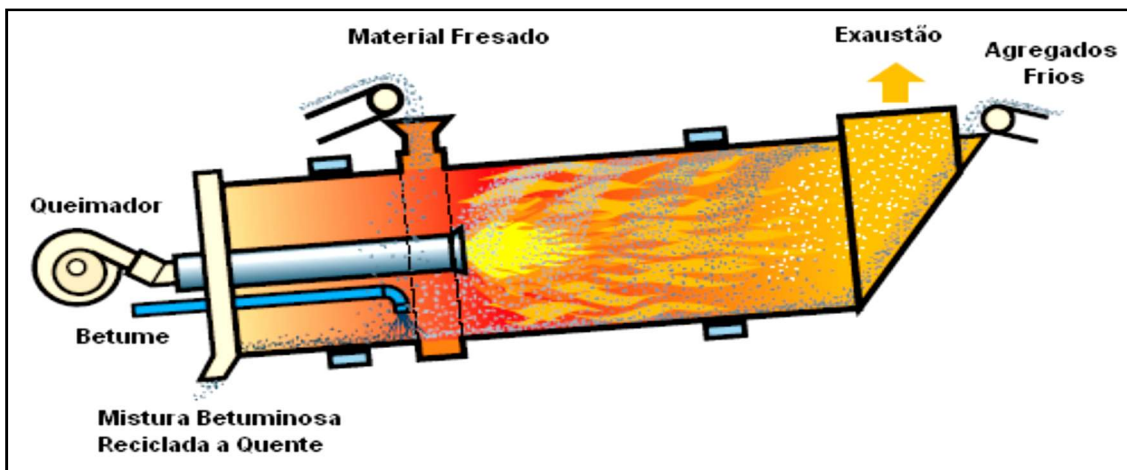


Figura 5.12 – Esquema do tambor secador misturador de central contínua de fluxos contracorrente (BAPTISTA, 2006)

Entre as soluções apresentadas, a que se mostra mais eficiente é a de tambor duplo, pois a medida em que a temperatura de aquecimento dos agregados é maior, a diferença existente pode ser da ordem de até 50°C, de acordo com a figura (5.13) fica claro que é necessário um menor consumo de energia para uma mesma taxa de produção de misturas recicladas, deixando visível que é o esquema de tambor duplo é uma metodologia com maior conformidade com o termo sustentabilidade.

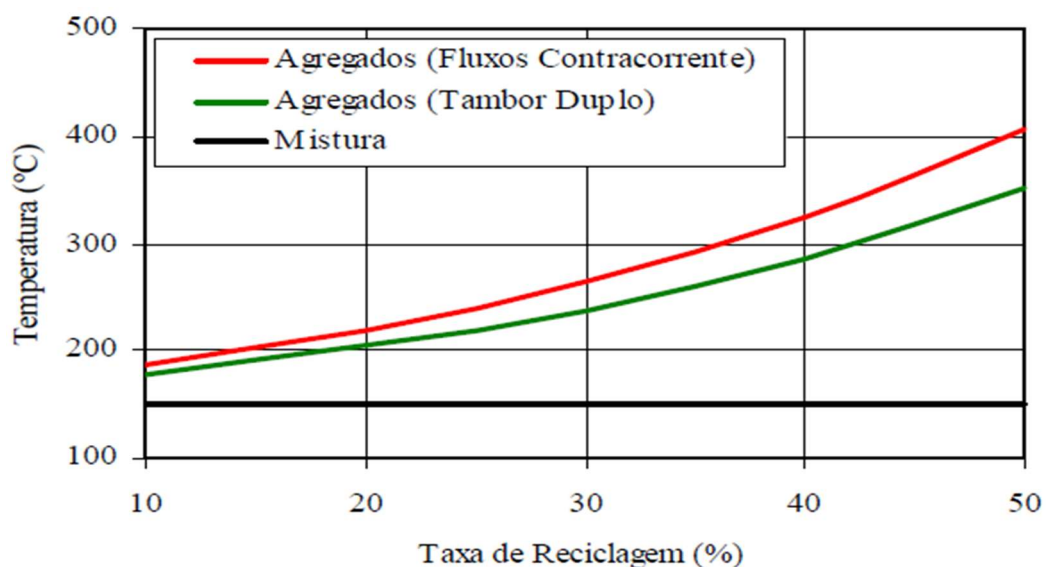


Figura 5.13 – Temperaturas observadas em centrais contínuas de fluxos contracorrente e de tambor duplo (BROCK E RICHMOND, 2006)

6. TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS FLÉXIVEIS

Neste capítulo será exposto de forma sintetizada as principais técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis utilizadas em Portugal, levando em conta seus processos de execução, tipos de ligante, temperatura de fabrico e locais de atuação. Com o intuito de simplificar o entendimento sobre as diversas técnicas de reciclagem utiliza-se a figura abaixo (Figura 6.1) onde é explicitado por meio de um fluxograma as principais características sobre as mesmas.

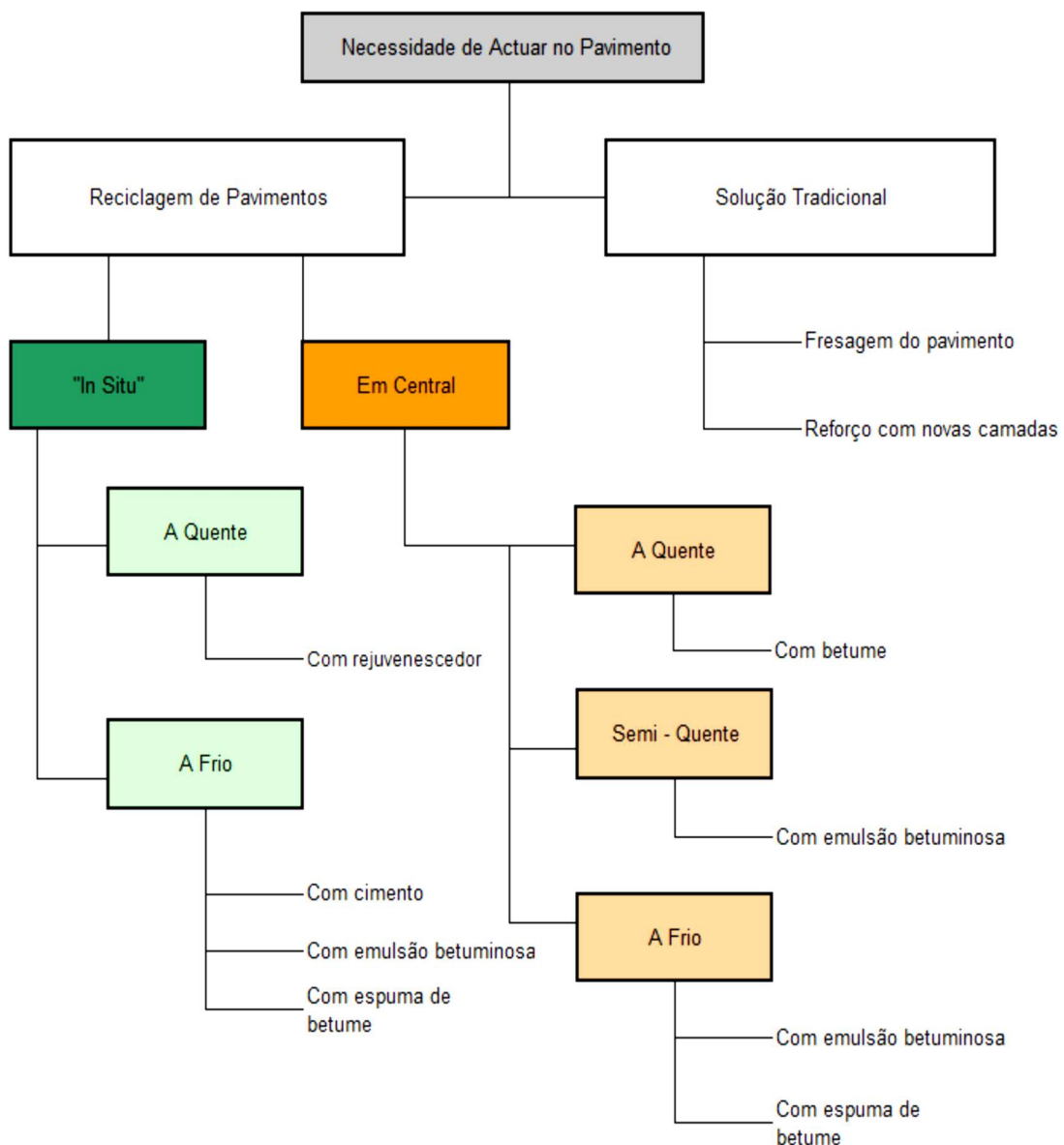


Figura 6.1 - Tipos de reabilitações em pavimentos flexíveis (CUNHA, 2010)

6.1. Reciclagem *In situ* a frio

Neste tipo de técnica de reciclagem, o pavimento degradado passa pelo processo de restauração no próprio local da via, sendo esta a principal característica e vantagem desta modalidade de reciclagem, pois os custos com o transporte dos materiais são atenuados de forma considerável, devido à falta de necessidade de transporte para centrais de reciclagem. Em contrapartida, a uma redução drástica quanto ao controle de qualidade de fabrico das misturas betuminosas recicladas, pois por se tratar de um processo de reciclagem no local, a mesma está mais sujeita as condições externas do ambiente e consequentemente as condições dos agentes climáticos que atuam sobre o local da reabilitação.

Em geral o processo como um todo ocorre de forma similar em sua fase inicial paras as diversas variações da reciclagem a frio que serão apresentadas a seguir. O pavimento deve passar por um breve processo de limpeza de modo a retirar todos os elementos estranhos, e materiais que possam prejudicar a composição das misturas recicladas como, por exemplo, materiais orgânicos, que ao passar do tempo podem comprometer partes do pavimento reestruturado.

Após a realização de todas as fases explicitadas anteriormente, como análise da via, determinação do grau de deterioração, dispensa de zonas muito contaminadas ou que não possam cumprir as especificações mínimas para serem recicladas, entre outros, e comprovando a viabilidade da reciclagem no local a frio, deve-se prosseguir com a passagem da máquina recicladora, que consiste em um equipamento provido de rotores capazes de fresar o pavimento existente em dimensões adequadas de acordo com a definição da mistura determinada inicialmente em fases de estudos, conforme as necessidades impostas pelo futuro tráfego que irá atuar sobre a via.

O equipamento denominado como máquina recicladora consiste em um veículo equipado com rotores de fresagem (Figura 6.2) capaz de proceder à desagregação do pavimento danificado existente em dimensões adequadas, determinadas em projeto, juntamente sendo capaz de misturar todo material fresado ao tipo de ligante a ser utilizado e posteriormente proceder ao espalhamento dessa mistura sobre o local onde ocorreu a fresagem.



Figura 6.2 – Rotores de fresagem de pavimento (Catálogo WIRTGEN GROUP, 2003)

A atuação da máquina recicladora deve ocorrer de forma lenta e sem interrupções, de modo a garantir a máxima uniformidade durante todo o processo. Segundo (AZEVEDO & CARDOSO, 2003) como na execução do processo seria impossível não haver interrupções, indica-se que as mesmas ocorram somente em últimos casos, e que quando ocorrem imediatamente sejam cortados os fornecimentos de água e ligantes sobre a mistura, de modo a evitar sobredosagens ou encharcamento excessivo do material reciclado.

Caso seja definido em projeto que será necessário a adição de materiais corretivos, devido à falta de determinados tipos de agregados ou de certas dimensões do mesmo, o espalhamento do mesmo deve ocorrer na pista antes da passagem do “comboio de reciclagem” conforme representado no exemplo genérico da imagem na sequência (Figura 6.3) que consiste na máquina recicladora ligada a equipamentos de fornecimento de ligantes e água, e logo atrás os equipamento responsáveis pela regularização e compactação do novo pavimento. Tal medida ocorre de modo a garantir a maior homogeneidade no processo de reabilitação, evitando a criação de trechos com determinada deficiência de material.

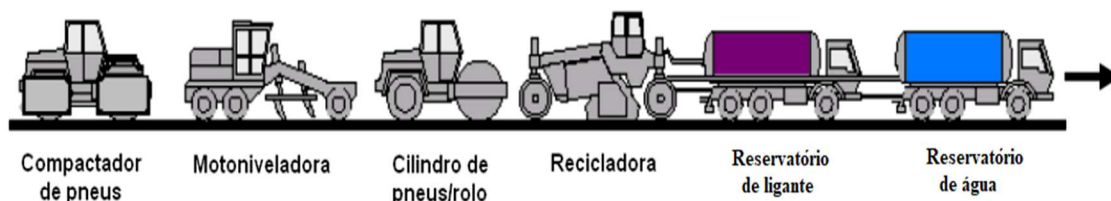


Figura 6.3 – Exemplo genérico de comboio de reciclagem In situ a frio (MARTINHO, 2004 - traduzido e adaptado de WIRTGEN, 2004)

A determinação da velocidade do comboio de reciclagem está diretamente ligada à composição inicial do pavimento antes do processo de reciclagem, sendo também influenciado pela determinação da solução final, o que consiste em determinadas condições de dimensões do agregado a ser reutilizado e a profundidade de execução da fresagem da via. Neste âmbito logo após a fresagem do pavimento danificado deve ocorrer a mistura com o ligante a ser utilizado e espalhado pelo próprio equipamento de reciclagem, sendo que em seguida de haver a passagem de equipamentos destinados a compactar e nivelar a aplicação da mistura reciclada. Inicialmente é indicado a passagem de um cilindro de rolo vibratório, sendo por último indicado a passagem de um compactador de pneus, oferecendo assim ao pavimento a densificação máxima, resultando em um comportamento estrutural satisfatório e proporcionando uma melhor sobreposição entre os elementos constituintes da mistura reciclada.

Com a adição de novos ligantes, e a possível introdução de materiais granulares de correção, a mistura estará suscetível ao fenômeno de empolamento, que consiste no aumento de volume verificado na mistura após o processo de fresagem e mistura. Para tal é recomendado o uso de uma motoniveladora entre as passagens dos cilindros de pneus ou rolo e o compactador de pneus, de modo a garantir um nivelamento correto do novo pavimento a ser executado. O processo de reciclagem no local a frio, possibilita ao projetista a escolha de diferentes tipos de ligantes a serem utilizados na formulação de uma solução final de pavimento, sendo que o seu comportamento estará diretamente ligado a essa escolha, entre os principais ligantes para este tipo de técnica podemos citar os seguintes:

- Reciclagem no local a frio com espuma de betume;
- Reciclagem no local a frio emulsão betuminosa;
- Reciclagem no local a frio com cimento.

A definição do ligante a ser utilizado deve ser previamente definida em fases iniciais de estudo e planejamento da obra, pois a sua escolha acaba por determinar o comportamento estrutural final do pavimento, o que acaba por condicionar em espessuras e formulações de misturas que serão aplicadas sobre a camada reciclada, o que representa a última etapa do processo de reciclagem.

De modo a garantir o cumprimento de exigências da via face ao tráfego que irá atuar sobre ela, é necessário se aplicar camadas betuminosas de desgaste sobre a camada resultante da reciclagem *in situ* a frio, tal processo ocorre devido ao não cumprimento de determinadas especificações da mistura reciclada, mas também a necessidade de um maior controle de qualidade final, para isso essas camadas a serem aplicadas posteriormente são provenientes de centrais betuminosas a quente, o que atribui aos pavimentos condições específicas, garantindo capacidades de utilização com segurança e conforto. Nos próximos subcapítulos irão ser tratados com um maior detalhamento a utilização dos principais tipos de ligantes nesta técnica de reciclagem de pavimento, de modo a ilustrar sua melhor utilização.

6.1.1. Reciclagem *In situ* a frio com espuma de betume

Neste tipo de técnica os processos de execução citados anteriormente são os mesmos, o que difere é apenas o ligante a ser utilizado, como o próprio nome sugere o tipo de material a ser utilizado para a ligação dos materiais granulares é constituído por uma espuma de betume. De acordo com a figura a seguir (Figura 6.4) podemos ver claramente o processo de obtenção desta espuma, onde o betume a temperaturas entre cento e trinta a cento e oitenta graus Celsius é exposto a pequenas porcentagens de ar e água fria (valores entre um e dois por cento). Tal combinação resulta em um aumento de volume do ligante (cerca de 30 vezes do seu volume inicial) e uma redução considerável de sua viscosidade, facilitando assim sua aplicação, onde a fase dispersa é um gás (vapor de água) e a fase contínua é o betume. (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008)

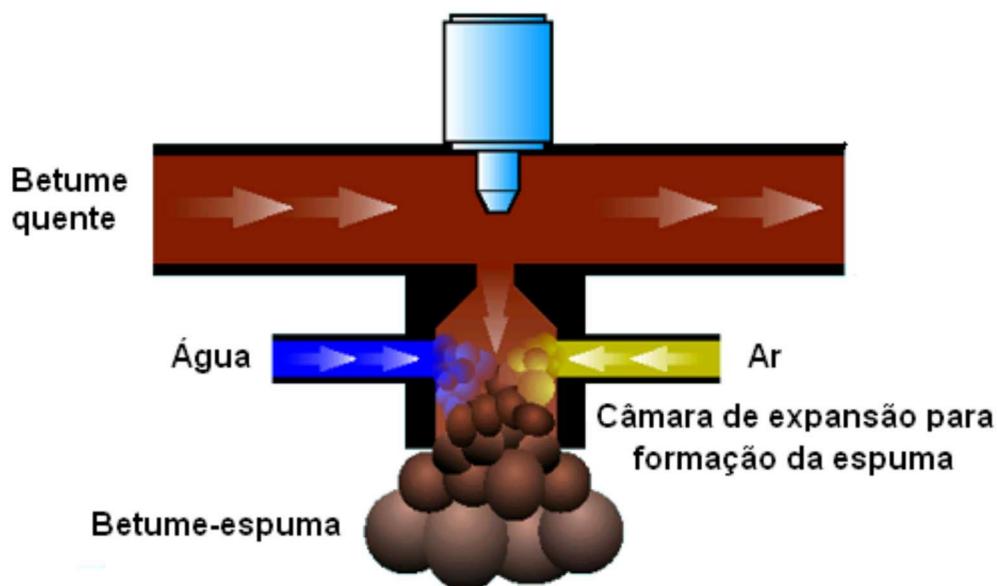


Figura 6.4 – Esquema da obtenção do betume-espuma (adaptado de WIRTGEN, 2004)

Neste processo não ocorre nenhuma reação química ao betume, sendo que o efeito obtido é apenas uma mudança temporária nas propriedades físicas do betume, com esta alteração o ligante tem por alguns segundos seu volume aumentado, onde juntamente com os agregados finos presentes na mistura, formarão uma argamassa que é responsável pela ligação dos demais agregados, resultando em uma sobreposição dos materiais reciclados. Esta combinação resulta em um “*um pavimento de alta qualidade, durável e flexível com um desempenho excepcional e resistente aos efeitos de climas extremos*” (SEIXAS, 2008).

Este tipo de técnica apresenta grandes vantagens em sua utilização, desde a sua praticidade e velocidade de aplicação, como também ao seu custo final de produção, porém este ligante é um produto sensível às variações de umidade do agregado, sendo assim devem ser tomadas medidas de modo a obter um maior controle dessas características dos materiais, com o intuito de se manter a melhor utilização possível do ligante. Mesmo com a necessidade de aquecimento do betume asfáltico, esta variação da técnica de reciclagem acaba por ser considerada como uma técnica de reciclagem a frio. Devido às demais fases do processo ocorrem à temperatura ambiente (fresagem, mistura, distribuição, nivelamento e compactação), sendo que seu processo de execução em obra ocorre como já citado através do “comboio de reciclagem” nesta técnica

representado de acordo com a abaixo (Figura 6.5). Segundo (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008) “A velocidade de avanço da recicladora e conseqüente rotação do tambor fresador tem influência decisiva sobre a granulometria resultante para a mistura produzida.” Sendo que a velocidade de passagem da recicladora (Figura 6.6) continua a ser determinada por conta da profundidade de fresagem e devido a determinação das características da mistura reciclada final, definidas no projeto de reabilitação do pavimento.

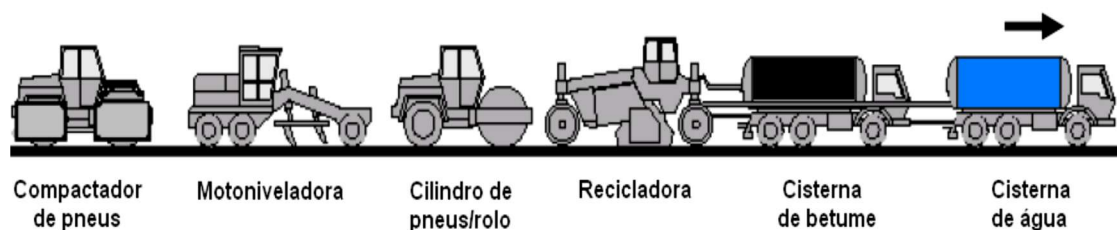


Figura 6.5 – Fases da reciclagem a frio *in situ* com betume-espuma (MARTINHO, 2004 - traduzido e adaptado de WIRTGEN, 2004)

As porcentagens de betume a utilizar variam entre 1,5% e 4% do volume total, sendo essas variações feitas de acordo com a composição do pavimento degradado, sendo o valor máximo para pavimentos com baixos teores de betume e o valor mínimo para pavimentos com alto teor de betume. Um fator que também exerce influência sobre o quantitativo de ligante a utilizar é o equipamento de utilização para a produção da espuma, variando os valores de acordo com as tecnologias de injeção de água e betume.

As camadas recicladas através dessa técnica assumem valores de deformabilidade entre 2000 e 5000 MPa, sendo o primeiro valor para misturas derivadas de um material com granulometria descontínua, e a segunda para misturas com a presença de materiais betuminosos. De acordo com (SEIXAS, 2008) “o tratamento de pavimentos flexíveis degradados com recurso à técnica *in situ* a frio com espuma de betume permite a obtenção de uma nova camada estrutural resistente às deformações plásticas e durável, mesmo em situações de climas extremos”. Dentro as várias vantagens desta técnica, apresenta-se ainda a vantagem, comparativamente às misturas recicladas com emulsão, de a circulação poder ser reposta logo após a compactação não estando, portanto, sujeita a um processo de cura (PICADO-SANTOS, 2005).

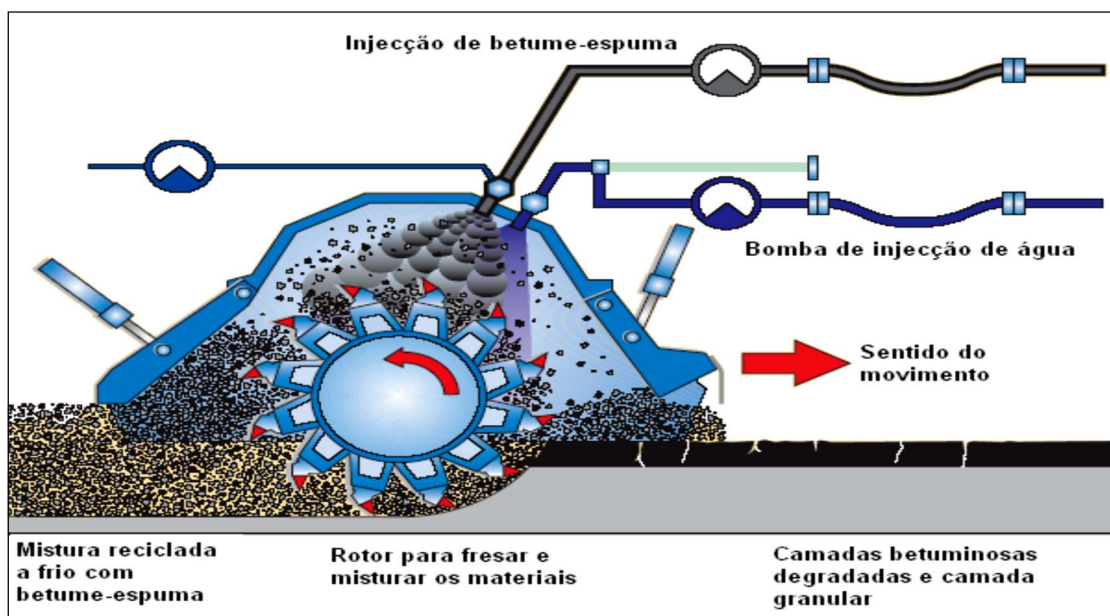


Figura 6.6 - Esquema da produção de mistura reciclada a frio *in situ* com betume-espuma (adaptado de WIRTGEN, 2004)

6.1.2. Reciclagem *In situ* a frio com emulsão betuminosa

Este tipo de técnica foi a primeira a ser utilizada em Portugal, sendo suas fases durante o processo de reciclagem similar aos demais métodos de reciclagem locais a frio já apresentados, a variação desta modalidade da reciclagem se dá através do modo de utilização do ligante betuminoso, que é introduzido na mistura reciclada por meio de emulsões. Pode-se afirmar que uma emulsão trata-se da dispersão homogênea de um líquido em forma de gotas de pequenas dimensões dentro de outro, que não acaba por não se misturar com o primeiro, sendo que as principais emulsões utilizadas são as aniônicas (carga negativa) e as catiônicas (cargas positivas), podendo ainda ser definidas em emulsões de rotura lenta, média ou rápida.

Dentro a reciclagem se tem uma maior utilização das emulsões de cargas positivas com rotura lenta, pois, de acordo com (PEREIRA & MIRANDA, 1999) “*Estes elementos vão invadindo a fase contínua do antigo ligante, dando origem a sistemática recuperação das propriedades reológicas e mecânicas das misturas tratadas, até a*

proximidade das iniciais.” Com a intenção de se facilitar ou acelerar o processo de rotura por vezes é adicionado cal ou cimento (valores entre 1 a 2% do volume total), além de acelerar o processo tal medida aumenta a coesão da mistura e diminui a sensibilidade a água, principalmente em casos que a mistura possua a presença de solos argilosos ou contaminados, tal medida é feita com a intenção de se poder proceder ao espalhamento da mistura reciclada pela via, garantindo que a rotura de emulsão ocorra logo após esta fase, proporcionando uma melhor adesividade entre o material proveniente da fresagem e o ligante aplicado por meio da emulsão. Nos casos em que é utilizado a junção de ligantes betuminosos e hidráulicos é associado à técnica de reciclagem o nome de reciclagem mista a frio, por conta da natureza dos aglutinantes utilizados (AZEVEDO & CARDOSO, 2003).

Este tipo de reciclagem busca tratar pavimentos deteriorados e envelhecidos em suas camadas superficiais, mas que possuam boa capacidade estrutural, sendo condizentes com a solicitação de tráfego existente e as fundações que compõem a via. As profundidades de reciclagem que se melhor adequa a esta técnica gira em torno de valores de 12 a 15 centímetros, sendo aceito como limites máximos profundidades até 20 centímetros. Em casos em que o foco não é a reabilitação estrutural e sim um processo de impermeabilização da via esta técnica pode ser utilizada em profundidades menores, variando entre 4 a 6 centímetros de espessura.

O valor de dosagem de emulsão a ser utilizado no processo de reabilitação do pavimento varia de acordo com a composição do material fresado do antigo pavimento, sendo esses valores entre 5 e 3% do volume total do material a se reciclar. Em casos em que a via a ser reabilitada possuir teores de betume elevado é aconselhável utilizar valores reduzidos de emulsão, de modo a evitar uma sobredosagem da mistura, para tal é indispensável a utilização de trechos experimentais da via, com isso é possível determinar o real comportamento do pavimento reciclado, e assim poder ajustar a formulação da mistura de acordo com a realidade do pavimento.

Esta técnica apresenta algumas limitações quanto a sua utilização, sendo principalmente devido a seu custo de utilização, pois em termos econômicos a utilização deste método gera mais custos do que o uso de espuma de betume ou cimento. Também é associado em termos negativos a esta metodologia a sua suscetibilidade aos agentes

climáticos e a condições do pavimento existente, de acordo com (BAPTISTA, 2006) “A reciclagem com emulsão exige um tempo de cura de 2 a 3 semanas, não devendo nesse período ser aplicada nova camada. Por essa razão, é extremamente importante que os trabalhos se realizem em tempo seco, sendo a técnica não recomendada em zonas úmidas.” Com isso o transtorno gerado aos usuários da via aumenta, devido a necessidade de uma maior paralisação da faixa onde se exerce a reestruturação.

O processo de reabilitação é similar aos demais, sendo utilizado também o “comboio de reciclagem” durante sua execução em obra, sendo neste caso necessários pequenos ajustes de modo a possibilitar a utilização de emulsões junto a máquina recicladora, sendo também necessária a utilização de um reservatório de água, pois as porcentagens de emulsão a serem utilizadas são muito reduzidas, sendo feita sua utilização de modo a atuar sobre os agregados secos proporcionando uma melhor integração entre os elementos de composição da mistura. Também neste caso a velocidade de deslocamento da máquina de reciclagem e consequentemente a rotação do fresador é determinado de acordo com as dimensões da mistura reciclada idealizadas em projeto da reabilitação. De acordo com a figura abaixo (Figura 6.7) pode-se demonstrar a disposição dos equipamentos utilizados na execução desta modalidade de reciclagem *In situ*.

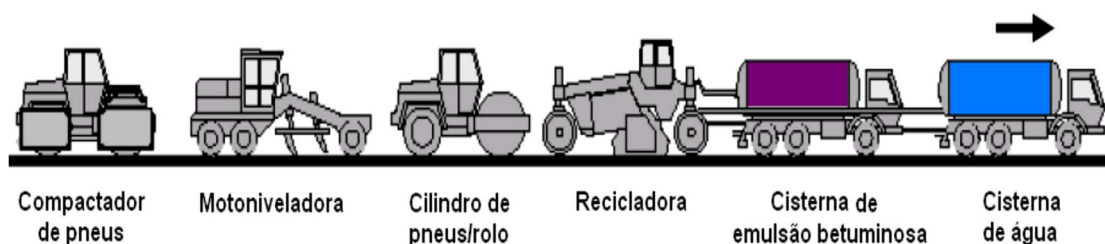


Figura 6.7 – Fases da reciclagem a frio in situ com emulsão betuminosa
(MARTINHO, 2004 - traduzido e adaptado de WIRTGEN, 2004)

Segundo (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008) as principais vantagens da utilização de emulsões na reciclagem de pavimentos flexíveis podem ser descritas como:

- Economia de matérias e de energia (técnica a frio);
- Desaparecimento de fendas, e interrupção de sua propagação;
- Manutenção da cota do antigo pavimento;
- Ganho de resistência estrutural.

Ainda segundo (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008) “Quando bem executada, o resultado desta técnica assemelha-se a um material de granulometria extensa tratado com emulsão, o que representa um grande ganho estrutural em relação ao anterior pavimento fendilhado.” Sendo que pode assumir valores de modo de deformabilidade entre 2000 a 5000 MPa em temperaturas entre 20 e 25° C, sendo que esses valores são obtidos de acordo com a composição dos materiais fresados, seus respectivos teores de betume e também ao quantitativo de emulsão betuminosa utilizado no processo de reabilitação do pavimento deteriorado (FONSECA, 2002). De acordo com a figura abaixo (Figura 6.8) fica representado o esquema de funcionamento desta metodologia de reciclagem *In situ* a frio.

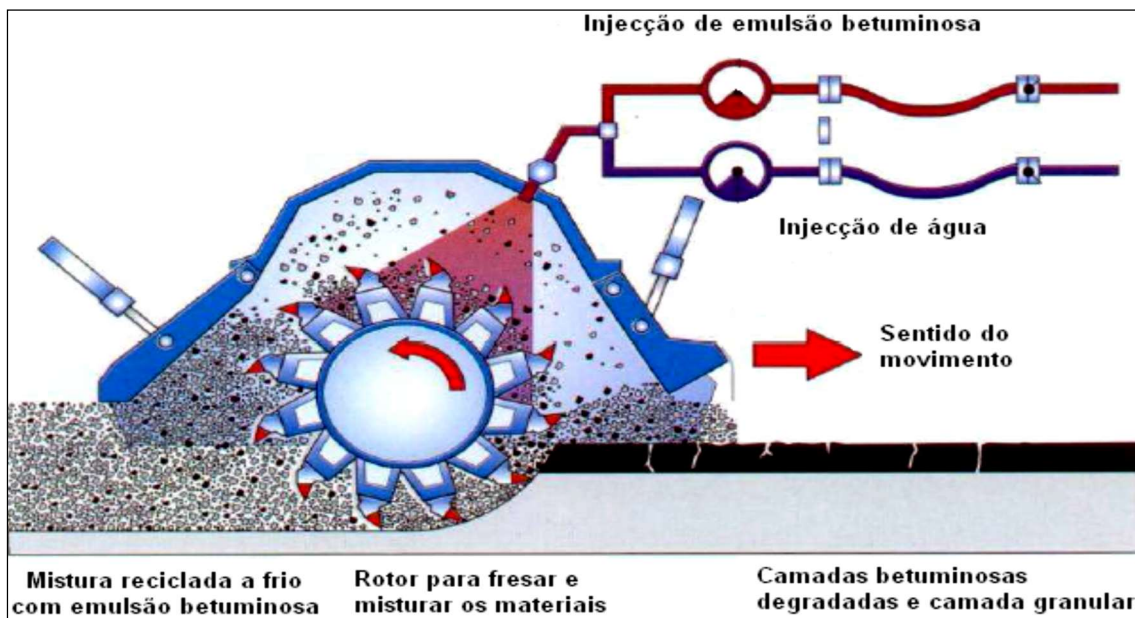


Figura 6.8 – Esquema de produção de mistura reciclada a frio in situ com emulsão betuminosa (adaptado de WIRTGEN, 2004)

6.1.3. Reciclagem *In situ* a frio com cimento

Este tipo de técnica é altamente recomendado em situações em que se possua um pavimento com sua camada betuminosa altamente deteriorada, mas com uma boa composição de matérias granulares, pois através do processo de reciclagem por meio da adição de ligantes hidráulicos, como o cimento, é possível dar origem a um pavimento com alta capacidade de resistência estrutural sendo uma das medidas de reabilitação com um custo de produção bastante atraente em relação às demais já apresentadas. A utilização desta técnica possui compatibilidade com grande parte da malha rodoviária portuguesa, segundo (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008) “*A reciclagem in situ, a frio, com cimento poderá constituir o processo mais econômico e adequado para grande parte dos pavimentos existentes em Portugal*”.

O processo de execução da reciclagem ocorre de forma similar aos demais métodos de reciclagem no local, a principal diferença deste segmento se dá por conta do ligante utilizado, no caso o cimento, e pela disposição dos equipamentos que compõem o “comboio de reciclagem”. A prática mais usual nesta técnica consiste na passagem inicial de um veículo em que procede ao espalhamento do ligante ao solo antes da utilização da máquina recicladora, similar ao processo de adição de agregados de correção caso seja necessário conforme a figura a seguir (Figura 6.9).



Figura 6.9 – Processo de distribuição do cimento sobre o pavimento (WIRTGEN, 2003)

Porém de acordo com (AZEVEDO & CARDOSO, 2003) “*Em casos em que a superfície a tratar for superior a 70.000 m² ou a categoria de tráfego superior a T4, deverão ser utilizados dispositivos que integrem em uma só máquina as operações de fresagem, dosificação, mistura e espalhamento*”. Tal medida é feita de modo a amenizar os transtornos aos usuários da via, reduzindo o tempo de execução da reabilitação do pavimento, pois mesmo após o processo de compactação, ainda será necessário um intervalo de tempo para a cura do trecho tratado, sendo no mínimo um prazo de sete dias sem a utilização do mesmo.

As demais fases ocorrem de forma similar aos outros processos, sendo necessária somente a integração de uma misturadora específica na máquina de reciclagem porque o ligante a ser utilizado é o cimento. Esta medida é feita de modo a proceder à mistura do material fresado juntamente com o ligante e água, obtendo assim uma mistura homogênea, pronta para o espalhamento em pista, regularização longitudinal por meio de motoniveladoras, caso seja necessário, e posteriormente sua compactação pelos equipamentos usuais já citados anteriormente. Segundo as disposições normativas do instituto de infra-estruturas rodoviárias de Portugal, o cimento a se utilizar deverá ser um cimento com altas porcentagens de aditivos ativos, como as pozolanas naturais ou artificiais (cinzas volantes). De acordo com (AZEVEDO & CARDOSO, 2003) “*Deverá utilizar-se um cimento com classe de resistência média 32,5 MPa. Cimentos de classe superior (42,5MPa) só devem ser utilizados sob condições especiais, por exemplo em situações de baixas temperaturas.*” O pavimento anteriormente do tipo flexível torna-se um pavimento semi-rígido, sendo necessário posteriormente à sua execução a aplicação de uma camada de betuminosa com propriedades de camada de desgaste, a fim de cumprir as especificações de projeto de reestruturação da via.

Através deste método é possível obter pavimentos de alta capacidade de resistência estrutural sem que seja necessária a execução de camadas com espessuras grandiosas. A utilização deste ligante na reciclagem de pavimentos flexíveis proporciona novos pavimentos com módulos de deformabilidade entre 5000 e 10000 MPa, variando de acordo com a origem do material de fresagem e a quantidade de ligante utilizado, que foi previamente definido em estudo de formulação da mistura (FONSECA, 2002). O resultado final obtido após o processo de compactação e cura do

pavimento reciclado com cimento, e de um tipo, segundo (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008) “Agregado de granulometria extensa tratado com cimento, a qual apresentará uma resistência bastante mais elevada que qualquer camada anteriormente existente no pavimento antigo.” Para tal, é necessário que as formulações sobre a percentagem de cimento em relação à massa da mistura reciclada sejam definidas de modo em que as misturas finais sigam as determinações impostas de acordo com o quadro abaixo (Quadro 6.1):

Porcentagem em cimento relativamente a massa em seco dos materiais a reciclar (mínima)	3.50%
Resistência á compressão simples aos 7 dias, (mínima)	3.5 MPa
Resistência á tração aos 7 dias, em ensaio diametral, (mínima)	0.4 MPa
Resistência á compressão simples aos 28 dias, (mínima)	4.0 MPa
Resistência á tração aos 28 dias, em ensaio diametral, (mínima)	0.7 MPa
Resistência á compressão simples aos 90 dias, (mínima)	8.5 MPa
Resistência á tração aos 90 dias, em ensaio diametral, (mínima)	1.2 MPa

Quadro 6.1- Características dos provetes em fase de formulação da mistura reciclada (Adaptado AZEVEDO, 2009)

Os corpos de provas utilizados nas formulações da mistura serão produzidos por meio de um martelo vibrador, de acordo com a norma EN 13286-4, com aplicação de carga de modo a proporcionar 97 % da baridade máxima obtida no ensaio proctor modificado. Sendo que o teor de água irá variar entre 4 e 6 % , sendo definido em laboratório de modo a obter o maior valor de resistência da mistura reciclada. Abaixo (Figura 6.10) representa-se o “comboio de reciclagem” utilizado na técnica de reciclagem *in situ* a frio com cimento.



Figura 6.10 – Fases da reciclagem a frio *in situ* com cimento em calda (MARTINHO, 2004 - traduzido e adaptado de WIRTGEN, 2004)

6.2. Reciclagem *In situ* a quente

Esta técnica por vezes pode ser tratada por termorregeneração ou termo-reperfilagem, e está associado á reabilitação de camadas superficiais do pavimento, sendo fortemente indicado seu uso em casos em que se busque atenuar os defeitos das camadas superficiais e os efeitos de descolagem das camadas de desgaste. Sua utilização é desaconselhada em pavimentos que possuam quaisquer problemas de ordem estrutural, sendo esta técnica de reciclagem considerada por vezes como uma metodologia quase exclusiva de reestruturação das qualidades funcionais das camadas iniciais do pavimento.

Esta técnica de reabilitação no local difere em vários aspectos das demais apresentadas anteriormente, sendo as principais diferenças por conta da temperatura de reciclagem, tipo de aglutinante utilizado e principalmente quanto ao principal equipamento de reabilitação no comboio de reciclagem. A principal diferença entre a termorregeneração e a termo-reperfilagem se dá por conta que na primeira modalidade ocorre o aquecimento do pavimento, sua fresagem, adição de um ligante rejuvenescedor e por fim seu espalhamento e compactação, sendo que na segunda variação da técnica só é feito o aquecimento da via existente e posteriormente sua compactação, com a intenção apenas de solucionar patologias de fendas e melhorar a regularização do perfil longitudinal. O ligante a ser aplicado nesta técnica usualmente é um rejuvenescedor que contém em sua composição elementos de betume que foram retirados do pavimento existente por conta do seu envelhecimento, possibilitando assim ao betume recuperar suas propriedades químicas e físicas iniciais.

Nesta técnica, no caso da termorregeneração, o pavimento é submetido à exposição de jatos de ar sobreaquecidos (valores entre 600° C) sob elevada pressão, isso ocorre por meio de equipamentos aquecedores (Figura 6.11) que compõem a fase inicial do processo de reciclagem, seguidos posteriormente por um aquecedor fresador, que promove a fresagem do pavimento existente e o reduz a dimensões adequadas segundo o projeto de reabilitação.



Figura 6.11 – Equipamento aquecedor – Reciclagem In situ a quente
(Adaptado catalogo WIRTGEN)

Após a fresagem da via, é dada a sequência parte da mistura do material, onde haverá a introdução do ligante rejuvenescedor e também a adição de materiais de correção caso seja necessário. Esta fase é desenvolvida no aquecedor misturador, onde após a execução dessa parte o mesmo proporciona o espalhamento da mistura sob o local de reciclagem onde irão atuar posteriormente os equipamentos de nivelamento e compactação usuais, como na figura abaixo (Figura 6.12).



Figura 6.12 – Comboio de reciclagem in situ a quente
(MARTINHO, 2004 - traduzido e adaptado de WIRTGEN, 2004)

Após a execução da reciclagem, indica-se providenciar a aplicação de uma camada nova com propriedades de uma camada de desgaste de modo a garantir que o pavimento possua características mínimas de segurança e conforto para a utilização dos usuários em sua camada de rolamento. Este tipo de solução produz um pavimento com

uma maior impermeabilidade à água, e proporciona uma melhoria nas propriedades do ligante envelhecido podendo também haver melhorias significativas sobre a resistência à derrapagem.

De acordo com (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008), “A desvantagem desta técnica está relacionada com o seu custo elevado, em comparação com outras técnicas concorrentes, além da poluição significativa do processo produtivo.” Outra desvantagem também associada a esta técnica é a limitação de espessuras possíveis (por volta dos sete centímetros), sendo que para superar isso seria necessária uma maior temperatura, o que aumentaria o consumo de energia e conseqüentemente envelheceria o betume, algo contrário do que se busca na reciclagem. Porém, mesmo sendo a técnica *in situ* menos eficiente em termos energéticos, a mesma ainda continua a ser mais atrativa em relação à reciclagem em usinas como mostra a quadro abaixo (Quadro 6.2).

PROCESSO	NECESSIDADE DE ENERGIA (BTU/Toneladas)
Recape com mistura nova (e = 4 cm)	581.98
Fresagem a frio e reciclagem a quente em usinas	
20% reciclado e 80% mistura nova (e = 4 cm)	542.049
40% reciclado e 60% mistura nova (e = 4 cm)	488.401
Reciclagem a quente na pista (e = 4 cm)	202.3

e = Espessura

Quadro 6.2 – Comparação de consumo de energia
(Adaptado DNIT, 2006)

6.3. Reciclagem em centrais a frio

Este tipo de técnica de reciclagem é utilizado, em casos em que se possua uma maior necessidade de controle de qualidade da mistura final, por se tratar da produção em um ambiente controlado, o mesmo fica menos suscetível a ações externas do ambiente, e há também um maior rigor quando a dosagem e qualidade dos materiais de composição da solução de reabilitação. A principal distinção entre os métodos no local “*in situ*” e os métodos em central se dá por conta da necessidade de transporte da

mistura, quer seja em sua fase de fresagem ou na sua fase de aplicação sobre o pavimento, tal fator agrega um número maior de processos no ato da reabilitação, sendo assim, é indispensável uma avaliação sobre a viabilidade de sua utilização ponderando temas como custo de produção e conseqüentemente seu tempo de execução, devido às possíveis distância existente entre as usinas de produção e o local de reabilitação da via.

O processo de execução da reciclagem é similar aos demais métodos já explicitados neste trabalho, inicialmente ocorre uma prévia limpeza do pavimento com a intenção de remover corpos estranhos ou matérias contaminantes, sendo logo em seguida feita a fresagem a frio do pavimento. Neste tipo de técnica o equipamento utilizado para a desagregação do solo existente é um pouco diferente das máquinas recicladoras já vistas anteriormente, sua atuação consiste exclusivamente em fresar o pavimento e direcionar o resíduo proveniente para um veículo que irá proceder ao transporte do mesmo até uma central de reciclagem, conforme representado na figura a frente (Figura 6.13).

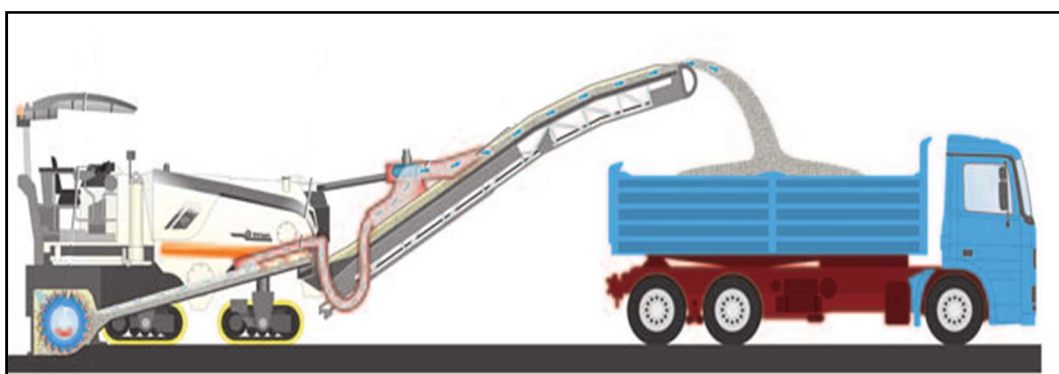


Figura 6.13 – Representação da Fresagem do pavimento (Catálogo WIRTGEN, 2003)

As dimensões dos elementos derivados da fresagem variam de acordo com a composição do pavimento existente, profundidade da fresagem e também a velocidade de avanço do equipamento, sendo também possível proceder a britagem em central desses materiais de modo a se obter as dimensões especificadas em projeto de mistura. Caso seja necessário poderá ocorrer à introdução de matérias de correção na mistura, podendo eles serem agregados virgem ou provenientes de estoques da usina de reciclagem com origem em outros pavimentos.

Usualmente neste tipo de reciclagem a frio, os ligantes utilizados são similares aos da técnica in situ, sendo principalmente utilizada a espuma de betume e a emulsão betuminosa. Sua utilização apresenta resultados semelhantes aos da técnica no local, porém com uma maior confiabilidade dos resultados a serem obtidos ao fim do processo de aplicação e compactação. Por muitos esta técnica é considerada inviável, devido ao aumento de etapas no processo face aos reais benefícios finais obtidos, sendo na maior parte das vezes aplicadas as metodologias de reciclagem a frio em técnicas in situ. Vale também ressaltar que nestes casos de reciclagem a frio em centrais não é possível reciclar todo o material proveniente do pavimento deteriorado, frequentemente estes valores estão limitados a cerca de 30% do volume total do material.

Na figura abaixo (Figura 6.14) pode-se representar o ciclo da reciclagem de pavimentos por meio da reciclagem em central a frio demonstrando suas principais etapas de funcionamento:

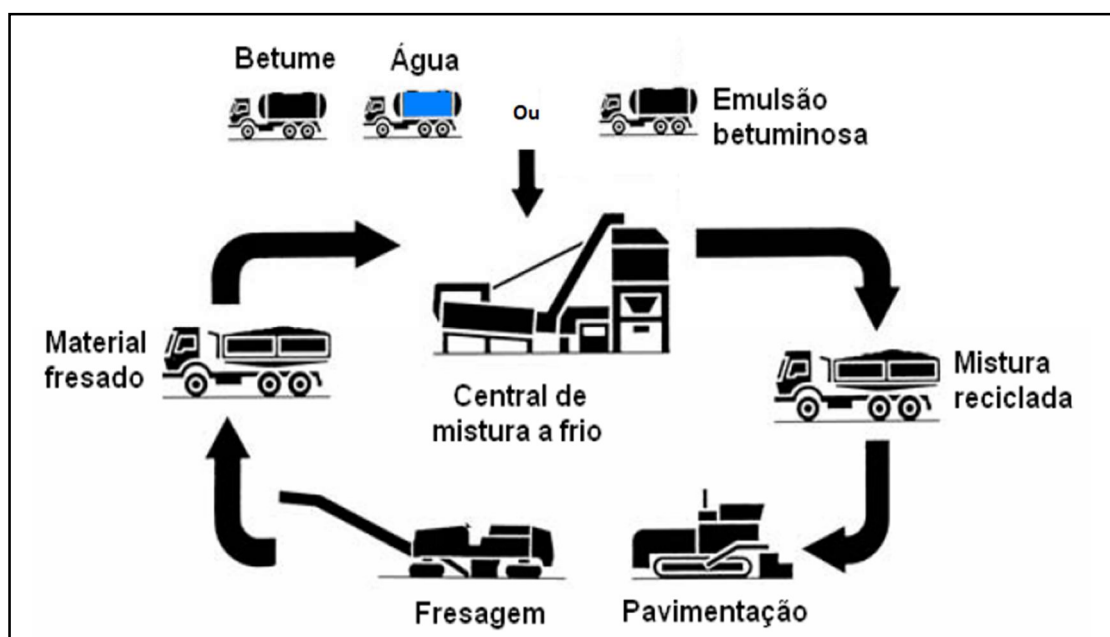


Figura 6.14 – Representação da reciclagem em central a frio (WIRTGEN, 2003)

No capítulo 5.2 já foram apresentadas os possíveis tipos de centrais presentes em uma usina de reciclagem de pavimentos, sendo para este tipo de técnica utilizadas as centrais descontínuas pela metodologia de adição a frio, onde o material fresado é introduzido no equipamento que irá proceder à mistura juntamente com o ligante a temperaturas ambientes. Dentro dessa fase o equipamento misturador deve proceder a uma homogeneização entre os agregados provenientes da fresagem e o ligante utilizado, resultando em uma mistura de acordo com as especificações impostas na formulação da mistura. Logo após esta fase a mistura é direcionada para os silos de armazenagem, onde posteriormente irão ser distribuídas em caminhões que irão proceder ao transporte até o local de reabilitação do pavimento, sendo depois executadas as fases de espalhamento, nivelção e compactação sobre a pista conforme já citado em técnicas anteriormente apresentadas.

6.4. Reciclagem em centrais semi-quente

Neste tipo de técnica os processos de execução são idênticos aos da reciclagem em central a frio, sendo suas únicas diferenças quanto à temperatura do método e ao ligante utilizado, sendo na maior parte das vezes utilizado a emulsão betuminosa como ligante, e em alguns casos recorre-se a utilização de emulsões modificadas devido a especificações de projeto. Neste tipo de técnica é possível obter uma taxa de reciclagem de até 100% do material proveniente da fresagem do pavimento, porém nesta técnica também é necessário recorrer aos estudos de viabilidade econômica, “*tendo em conta os elevados custos de transporte, assim como quanto a necessidade de obter adequada granulometria*” (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008)

De forma similar a reciclagem a quente, os materiais de composição também são aquecidos na fase de mistura, contudo os valores de temperaturas são reduzidos, variando de 70° a 95° C, sendo que nos casos a quente estes valores chegam até 140° C. Com esta prática é possível obter uma redução da viscosidade do betume, possibilitando uma maior eficácia no processo de mistura e homogeneização entre o ligante e o agregado. Após a conclusão da mistura a mesma é direcionada imediatamente ao transporte até o local de aplicação, podendo também ser armazenada por até um dia,

deste que seu armazenamento e aplicação sejam feitos em temperaturas iguais ou superiores a 60° C.

Esta técnica também oferece a vantagem de agilidade no processo de reabilitação do pavimento degradado, sendo segundo (BAPTISTA, 2006) “O aquecimento a que é submetido o material fresado permite que a abertura ao tráfego seja imediata, eliminando-se assim o período de cura necessário no caso da reciclagem a frio com emulsão.” De acordo como a imagem abaixo (Figura 6.15) é possível representar as fases da execução da reciclagem em central semi-quente.

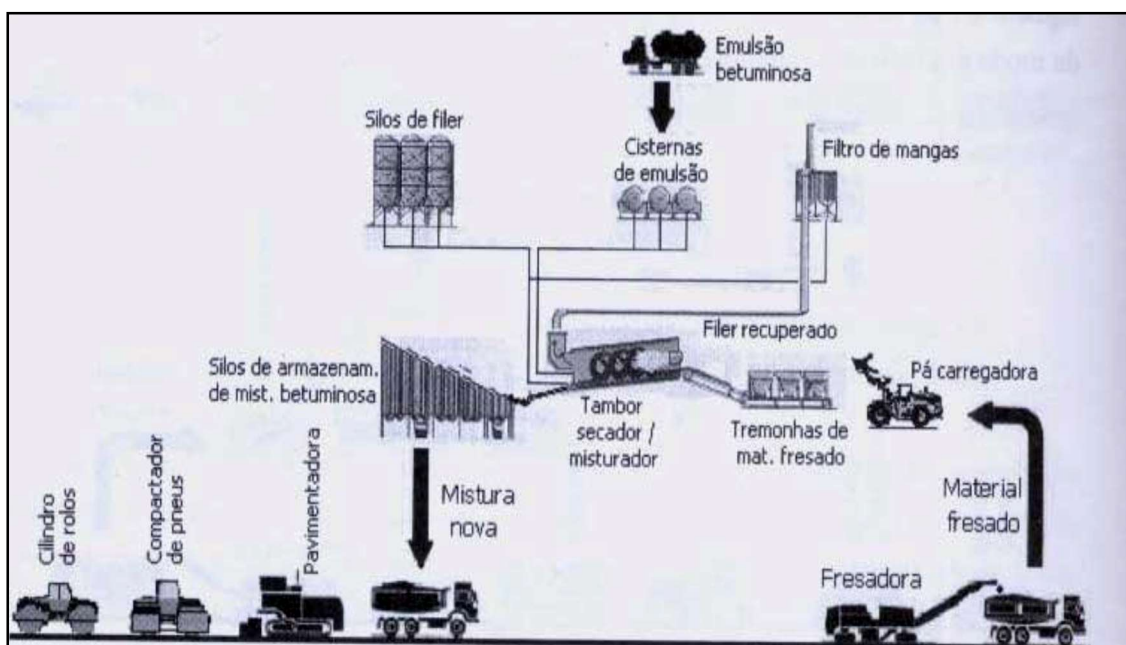


Figura 6.15 – Fases da reciclagem em central semi-quente (BRANCO, PEREIRA & SANTOS, 2008)

6.5. Reciclagem em centrais a quente

A técnica de reciclagem em central a quente oferece uma solução viável em face de quase todos os problemas relacionados às patologias que atuam sobre um pavimento danificado, sendo também uma das técnicas com um maior custo de produção devido às elevadas temperaturas que atuam sobre as misturas em seu processo de fabricação.

Como as demais técnicas de reciclagem em central, também nesta é necessário uma prévia análise da viabilidade de utilização da mesma, pois por se tratar de uma técnica de reabilitação em central, a ocorrência de aumentos de processos como transporte do material fresado, necessidade de aquecimento, entre outros, acabam por aumentar muito o custo final de reabilitação por esta técnica.

De acordo com (PEREIRA & MIRANDA, 1999) “*A qualidade das misturas realizadas com os materiais reciclados a quente são comparáveis á das misturas realizadas com materiais novos.*” Isso ocorre devido ao maior controle de qualidade possível em processos que são efetuados em ambientes controlados, como no caso das usinas de reciclagem e também as altas temperaturas utilizadas no processo de fabrico que possibilitam uma maior integração entre os agregados de correção, matérias de correção e os possíveis ligantes utilizados. As temperaturas de aquecimento dos elementos de composição da mistura variam de acordo com o tipo de central utilizada (contínua ou descontínua) e de acordo com a taxa de reciclagem definida, mas de forma genérica seus valores variam entre temperaturas de 100° C a 140° C.

Neste tipo de reciclagem o ligante a ser utilizado é usualmente o betume, podendo em alguns casos serem utilizados produtos rejuvenescedores a base de betume de modo a tratar previamente o betume envelhecido presente nos materiais fresados devolvendo lhe as partes mais leves que lhe fazem falta, e em determinados casos onde a taxa de reciclagem é baixa utiliza-se o betume puro, na maior parte das vezes sendo o de penetração 50/70.

Durante o processo de fresagem do pavimento deve-se ter atenção as dimensões resultantes deste processo de modo a garantir uma homogeneização da granulometria da mistura sendo indicado de acordo com (PEREIRA & MIRANDA, Gestão da conservação dos pavimentos rodoviários, 1999) que a características dos materiais possuam granulometria sem ligante entre 0/10 a 0/14 mm e com ligante entre 0/20 e 0/31 mm, possuindo ainda um teor em finos entre 8% e 12 %. Já o teor de betume utilizado na mistura varia entre 4% a 6% do volume total dos agregados, tal valor é recomendado de modo que ocorra todo o envolvimento do agregado, mas que também não ocorra uma sobredosagem de ligante na mistura, sendo seu valor final determinado por meios de ensaios de modo a se obter o teor ótimo de betume da mistura.

Durante o processo de aquecimento dos agregados na unidade de tambor secador conforme explicitado no capítulo 5.2, deve-se ter cuidado de modo que o agregado não seja exposto diretamente a chamas, pois tal ocorrência aumentaria o envelhecimento do betume e conseqüentemente produziria maior poluição por conta dos gases gerados neste processo. Após a conclusão do fabrico da mistura a mesma deve ser direcionada a silos de armazenamento de misturas betuminosa, onde posteriormente serão direcionadas para os locais de reabilitação do pavimento, onde deve ocorrer seu espalhamento, nivelção e compactação de forma similar a citada em outros métodos. De acordo com a (Figura 6.15) é possível observar as fases que contemplam a reciclagem em central a quente, ficando evidenciado que a principal diferença existente entre as demais é quanto à temperatura de execução e quanto ao ligante.

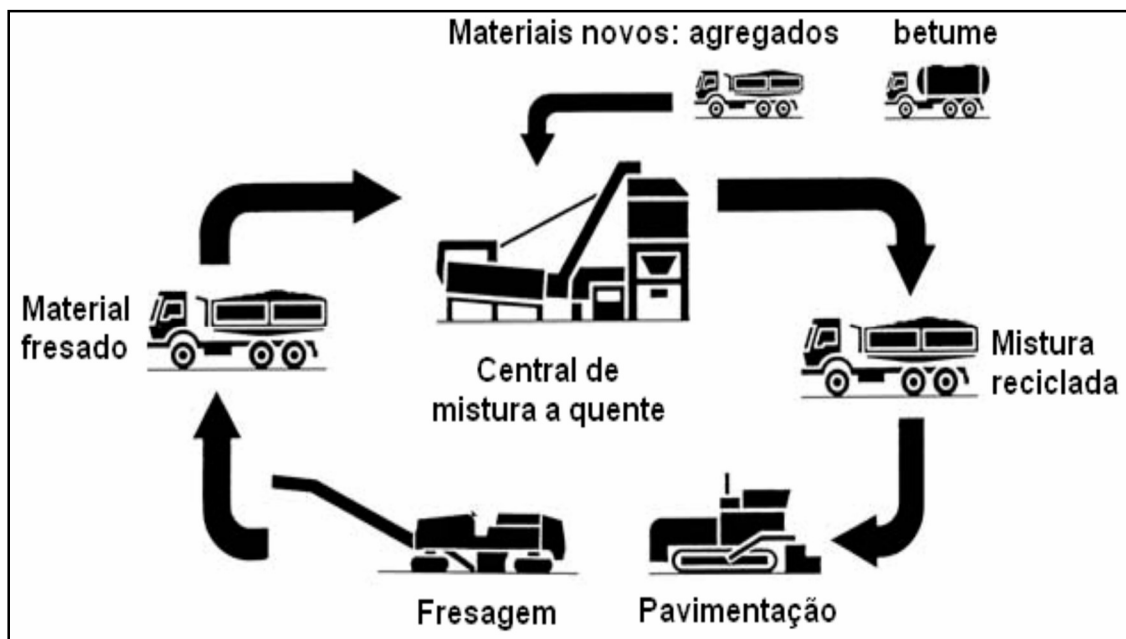


Figura 6.16 - Esquema do processo de reciclagem a quente em central

(adaptado de WIRTGEN, 2003)

7. AVALIAÇÕES E RECOMENDAÇÕES DE UTILIZAÇÃO

7.1. Tabelas de utilização – Técnicas de reciclagem

A determinação do uso de determinada metodologia de reciclagem implica em uma série de análises complexas e que variam de acordo com cada caso em particular, porém com todo conhecimento explicitado exaustivamente neste estudo é possível o desenvolvimento de quadro (Quadro 7.1 a 7.5) que proporcionam uma maior facilidade de compreensão sobre determinada técnica e conseqüentemente seus principais pontos positivos e negativos com base em todas as bibliografias até aqui já referenciadas. O principal intuito para a utilização das determinadas tabelas consiste num pré-direcionamento para determinada modalidade de reciclagem, sendo sua divisão feita com base em critérios de local de produção e temperaturas de fabricação.

Reciclagem In situ a frio	INDICAÇÃO DE USO DE ACORDO COM O TIPO DE DEGRADAÇÃO	
	Fendilhamento por fadiga	✓
	Exsudação	✗
	Ondulações	✓
	Deformação localizada	✓
	Fendas longitudinais	✓
	Polimento dos agregados	✗
	Desagregação superficial	✗
	Rodeiras	✗
	VANTAGENS	
1- Possibilidade de incorporação de 100% do material fresado		
2- Dispensa zonas de vazadouro		
3- Menor consumo de energia no processo de reabilitação		
4- As novas misturas podem ser empregues em camada de base		
5- Aumenta a capacidade estrutural do pavimento		
DESVANTAGENS		
1- Não apresenta o mesmo padrão de qualidade ao longo de toda obra		
2- Qualidade do trabalho afetada pelas condições locais da obra		
3- Depende de condições climáticas		
4- Interferência com o tráfego		
5- Necessita de uma camada de sobreposição		

Quadro 7.1 - Recomendações de uso Reciclagem in situ a frio

Reciclagem In situ a quente	INDICAÇÃO DE USO DE ACORDO COM O TIPO DE DEGRADAÇÃO	
	Fendilhamento por fadiga	✓
	Exsudação	✓
	Ondulações	x
	Deformação localizada	✓
	Fendas longitudinais	x
	Polimento dos agregados	✓
	Desagregação superficial	✓
	Rodeiras	✓
	VANTAGENS	
	1- Possibilidade de incorporação de 100% do material fresado	
	2- Dispensa zonas de vazadouro	
	3- Melhora as características funcionais do pavimento	
	4- Diminui a permeabilidade do pavimento á água	
	DESVANTAGENS	
	1- Não pode ser utilizada quando existem problemas estruturais do pavimento	
	2- Elevado consumo de energia	
	3- Emissões de substancias poluentes para a atmosfera	
4- Equipamentos de reciclagem muito complexo		

Quadro 7.2 - Recomendações de uso Reciclagem in situ a quente

Reciclagem em central a frio	INDICAÇÃO DE USO DE ACORDO COM O TIPO DE DEGRADAÇÃO	
	Fendilhamento por fadiga	✓
	Exsudação	x
	Ondulações	✓
	Deformação localizada	✓
	Fendas longitudinais	✓
	Polimento dos agregados	x
	Desagregação superficial	x
	Rodeiras	x
	VANTAGENS	
	1- As novas misturas podem ser empregues em camada de base	
	2- Aumenta a capacidade estrutural do pavimento	
	3- A qualidade da mistura não é afetada por fatores climáticos	
	4- Maior controle de qualidade das misturas obtidas	
	DESVANTAGENS	
	1- Necessidade de transportar o material fresado até a central	
	2- Impossibilidade de incorporar 100% do material fresado	
	3- Necessita de zonas de vazadouro	
4- Necessita de uma camada de sobreposição		

Quadro 7.3 - Recomendações de uso Reciclagem em central a frio

Reciclagem em central a quente	INDICAÇÃO DE USO DE ACORDO COM O TIPO DE DEGRADAÇÃO	
	Fendilhamento por fadiga	✓
	Exsudação	✓
	Ondulações	✓
	Deformação localizada	✓
	Fendas longitudinais	✓
	Polimento dos agregados	✗
	Desagregação superficial	✗
	Rodeiras	✓
	VANTAGENS	
	1- A qualidade da mistura não é afetada por condições climáticas	
	2- Maior controle de qualidade das misturas obtidas	
	3- As novas misturas podem ser empregues em camadas de base, regularização e desgaste	
	4- As misturas obtidas são comparadas qualitativamente a misturas novas	
	DESVANTAGENS	
	1- Necessidade de transportar o material fresado até a central	
	2- Maior consumo de energia	
3- Emissão de substancias poluente para a atmosfera		
4- Necessita de zonas de vazadouro		
5- Custos mais elevados		

Quadro 7.4 - Recomendações de uso Reciclagem em central a quente

Reciclagem em central semi-quente	INDICAÇÃO DE USO DE ACORDO COM O TIPO DE DEGRADAÇÃO	
	Não são conhecidas as reais características de desempenho das misturas	
	VANTAGENS	
	1- Possibilidade de incorporar 100% do material fresado	
	2- A qualidade da mistura não é afetada por fatores climáticos	
	3- Maior controle de qualidade nas misturas obtidas	
	4- Menor consumo de energia	
	DESVANTAGENS	
	1- Necessidade de transportar o material fresado até a central	
	2- Técnica pouco desenvolvida	
3- Não são conhecidas as reais características de desempenho das misturas		
4- Pouca utilização e conseqüentemente pouca mão de obra especializada		

Quadro 7.5 - Recomendações de uso Reciclagem em central semi-quente

7.2. Tabelas de vantagens e desvantagens – Tipos de ligantes

A vasta diferenciação entre os resultados finais obtidos por meios das técnicas de reciclagem ocorre por vezes não só por conta do tipo de ambiente de produção ou equipamento utilizado em sua execução, o tipo de ligante utilizado na produção da mistura exerce grande influência sobre seu comportamento final, desta forma de acordo com (LEWIS & COLLINGS, 1999) é sintetizado as características de destaque de cada tipo de ligante por meio do quadro abaixo (Quadro 7.6).

CIMENTO	VANTAGENS
	1- Facilidade de aplicação
	2- Confere elevada rigidez á camada
	3- Usualmente possui menor custo que o betume e emulsão
	DESVANTAGENS
	1- Fendilhamento da camada 2- Pouca flexibilidade e dificuldades de adptar-se a irregularidades da camada inferior
EMULSÃO BETUMINOSA	VANTAGENS
	1- Facilidade de aplicação, a emulsão é diretamente pulverizada na câmara de mistura da máquina recicladora.
	2- O tratamento com emulsão produz uma camada flexível e resistente a fadiga
	3- Aumento da resistência da camada
	DESVANTAGENS
	1- Possui maior custo do que o cimento e a espuma de betume 2- Maior sensibilidade as condições climáticas 3- Processo de cura lento
CIMENTO+EMULSÃO (Reciclagem Mista)	VANTAGENS
	1- Processo de cura é mais rápido
	2- Menor sensibilidade á água
	3- Não existe propensão para fendilhamento por retração
	DESVANTAGENS
	1- Mais caro que o cimento e que a emulsão 2- Pode ocorrer ruptura prematura ao entrar em contato com o cimento
ESPUMA DE BETUME	VANTAGENS
	1- Resulta uma camada flexível com boa resistência a fadiga
	2- Não existe propensão para fendilhamento da camada por retração
	3- Abertura imediata ao tráfego após compactação
	4- Menor custo do que cimento e emulsão
	DESVANTAGENS
1- Necessidade de aquecer o betume a 180º C 2- Material com menos de 5% de finos não pode ser utilizado	

Quadro 7.6 – Características dos ligantes (Adaptado de LEWIS & COLLINGS, 1999)

7.3. Avaliação de desempenho das misturas recicladas

Após toda a caracterização das fases que compreendem o processo da reciclagem de pavimentos flexíveis é importante salientar detalhes práticos sobre seu comportamento em uma estrutura de pavimento rodoviário, desta forma com o intuito de tornar mais prático a compreensão acerca das informações que serão demonstradas, serão selecionadas apenas duas metodologias de reciclagem sendo elas as mais usuais atualmente em Portugal. Uma se trata de uma técnica “In situ” e outra em central, sendo nomeadamente a reciclagem “In situ” a frio com emulsão betuminosa e a outra a reciclagem em central a quente.

Com base em informações adquiridas em estudos já publicados sobre misturas betuminosas recicladas e com a utilização do software JPAV que consiste em uma aplicação para a análise estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis desenvolvido pelo Professor Jorge C. Pais da universidade do Minho (PT) é possível simular numericamente de acordo com os modos de deformabilidade da misturas que compõem a estrutura do pavimento qual a vida útil da via em função de número de eixos padrões de 80 KN admissíveis em relação ao critério de ruína por fadiga do pavimento.

Para se controlar os fenômenos de fadiga nos pontos críticos dos pavimentos flexíveis, é necessário avaliar o valor das extensões (tensões) ocorridas nesses pontos resultantes da aplicação de um carregamento (passagem dum rodado de eixo padrão), juntamente também é necessário definir-se uma lei de comportamento dos materiais envolvidos (Lei de fadiga) que ao relacioná-la com as extensões observadas no pavimento possa se definir um número de repetições de carga aceitáveis antes que o pavimento entre em ruína devido à atuação desse esforço repetitivo. Para tal análise foi recorrido ao uso da lei da fadiga sugerido pelo método de dimensionamento de pavimentos desenvolvido pela SHELL, onde o critério de fadiga é expresso por uma equação que relaciona a extensão radial de tração (na base das camadas betuminosas) com a vida útil, N80, expressa em termos de número acumulado de eixos padrão de 80 KN, onde a mesma é representada de acordo com a seguinte expressão a frente:

$$\epsilon_t = (0.856 * v_b + 1.08) * E_m^{-0.36} * N_{80}^{-0.2} \quad (7.1)$$

Onde:

E_m = Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (Pa);

N_{80} = Número acumulado de eixos padrão de 80 KN;

v_b = Porcentagem volumétrica de betume no volume total (%);

ϵ_t = Extensão radial de tração (na base das camadas betuminosas).

Alterando a disposição dos termos e colocando em ordem de N_{80} resulta a seguinte fórmula para o cálculo de vida útil do pavimento:

$$N_{80} = \left(\frac{\epsilon_t}{(0.856 * v_b + 1.08) * E_m^{-0.36}} \right)^{\frac{-1}{0.2}} \quad (7.2)$$

Para a definição dos respectivos módulos de deformabilidade a serem utilizados nesta análise buscou-se informações sobre misturas com composição granulométrica extensa que foram alvo de ensaios com a mesma frequência (10 Hz) e com porcentagens de ligantes similares de modo a tornar mais válido a comparação sobre a eficiência de cada método, Desta forma de acordo (BAPTISTA, 2006) e (JIMÉNEZ, 2003) e possível definir os seguintes quadros (Quadro 7.7 e 7.8):

Mistura reciclada In Situ a frio com emulsão betuminosa	Período	
	6 meses	5.2 anos
Módulo de deformabilidade (MPa)	4550	4700
Módulo médio de deformabilidade (MPa)	4625	
Porcentagem de ligante (%)	4	
Temperatura	20° C	
Frequência	10 Hz	

Quadro 7.7 – Módulo de deformabilidade de mistura reciclada in situ com emulsão (Adaptado de JIMÉNEZ, 2003)

Mistura reciclada em central a quente com betume	
Módulo de deformabilidade (MPa)	8793
Taxa de reciclagem (%)	30
Porcentagem de ligante (%)	4.2
Tipo de de ligante	35/50
Temperatura	25° C
Frequência	10 Hz

Quadro 7.8 – Módulo de deformabilidade de mistura reciclada em central a quente (Adaptado de BAPTISTA, 2006)

Como os módulos de deformabilidade foram definidos em temperaturas diferentes é necessário se fazer uma homogeneização dos dados adquiridos, para tal foi utilizado a expressão desenvolvida por Antunes (1993), que permite corrigir o efeito da temperatura nos módulos de deformabilidade estimados com base nos ensaios de carga, podendo assim uniformizar os dados obtidos. Na técnica *in situ* o módulo é definido para temperatura de 20° C, por isso é necessário modificá-lo de modo que seu valor seja dado de acordo com a temperatura da reciclagem em central que tem o valor de 25° C adotado para essa análise como a temperatura de referência. A conversão é feita de acordo com a seguinte expressão:

$$E_T = (1.635 - 0.0317 * T) * E_{20} \quad (7.3)$$

Onde:

E_T = Módulo de deformabilidade a temperatura de referência

E_{20} = Módulo de deformabilidade a temperatura de 20° C

T = Temperatura de referência

Desta forma é possível definir o módulo de deformabilidade da mistura reciclada *In situ* com emulsão de acordo com a temperatura da outra mistura betuminosa em análise, sendo seu valor de 4625 MPa a temperatura de 20° convertido a 3896 MPa a uma temperatura de 25° C definida para este caso como a temperatura de referência.

7.3.1. Aplicação do software JPAV

Com a definição do comportamento mecânico das misturas referenciadas anteriormente já é possível avaliar a vida útil do pavimento de acordo com as extensões que ocorrem dentro da sua estrutura, para isso é necessário se definir uma situação modelo, de modo a visualizar a vida residual do pavimento de acordo com sua composição e espessuras. Para esta comparação foi definido uma situação modelo (Figura 7.1) com a composição de uma estrutura de pavimento já pré-definida, onde a única variação que ocorrerá será em sua camada base, onde se pretende utilizar a camada reciclada. A estrutura do pavimento segue definida de acordo com a figura representada em seguida:

	Espessura	Módulo (E) Mpa
Camada de Desgaste - (BD)	→ 5 cm	4200
Camada de Base - Mistura betuminosa reciclada	→ Variável	8793 ou 3896
Camada de Sub-base (Sbg)	→ 20 cm	545
Fundação	∞	150

Figura 7.1 – Estrutura do pavimento (Situação modelo)

Onde:

- Camada de desgaste
Agregado granítico britado de granulometria 0/14, peso específico = 26,4 kN/m³
Betume asfáltico 50/70 de peso específico = 10,2 kN/m³.
- Camada granular de sub-base
Agregado calcário britado de granulometria 0/40, peso específico = 25,5 kN/m³;
Apresenta um CBR_{min}= 60 %, em laboratório.
- Solo de fundação
CBR (médio) = 15% com um desvio padrão de 2%.

Por meio da utilização da aplicação de análise estrutural de pavimentos JPAV (Figura 7.2) é possível simular as extensões que ocorrem sobre pontos específicos do pavimento por conta da simulação da aplicação de uma carga padrão (80 KN) sobre a via, desta forma com a utilização destas extensões máximas juntamente com a lei da fadiga é possível definir a vida residual do pavimento em números de eixos padrões. Para a utilização da aplicação de análise estrutural é necessário a determinação dos módulos de deformabilidade da mistura que acabam por estabelecer a relação entre a tensão aplicada (δ) e sua respectiva extensão (ϵ) juntamente com suas espessuras e também seu coeficiente de Poisson, em geral defini-se como boa indicação a proposta por Quaresma (LNEC, 1985), resultante de análises realizadas a materiais portugueses, que se traduz pela adoção de um valor de 0.35 para o coeficiente de Poisson das misturas betuminosas. De modo a simplificar a compreensão dos dados obtidos com várias simulações feitas pela aplicação, recorre-se a uma representação gráfica das informações obtidas (Figuras 7.3 e 7.4), onde é possível observar a relação entre a espessura da camada com a vida residual do pavimento, que de acordo com o aumento da espessura da camada reciclada ocorre da mesma forma um aumento significativo da vida útil desse pavimento em relação à espessura inferior.

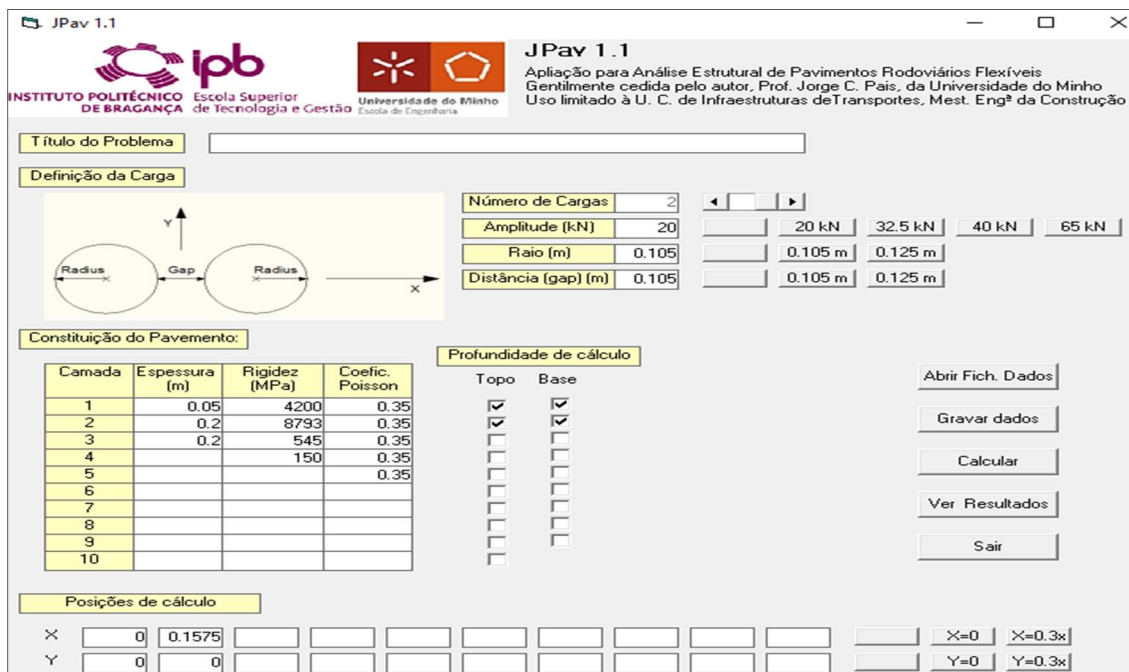


Figura 7.2 – Interface do software JPAV (Desenvolvido pela universidade do Minho)

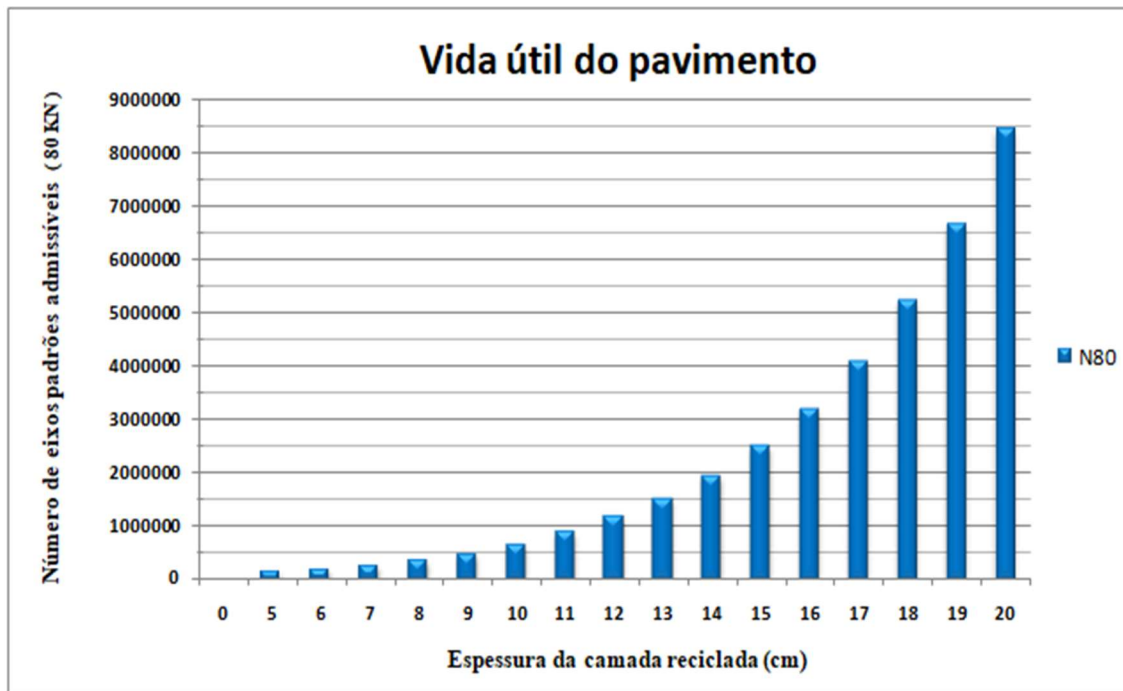


Figura 7.3 – Gráfico sobre vida útil das misturas recicladas In situ a frio com emulsão (Simulação desenvolvida por meio da aplicação JPAV)

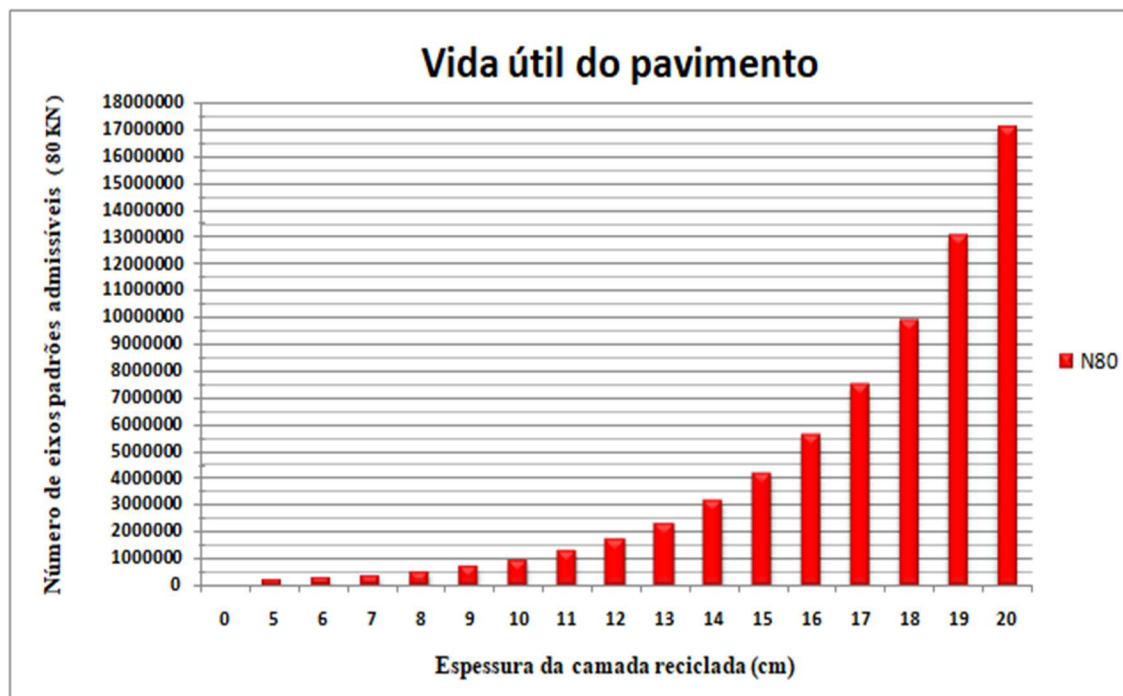


Figura 7.4 – Gráfico sobre vida útil das misturas recicladas em central a quente (Simulação desenvolvida por meio da aplicação JPAV)

Através dos gráficos acima é possível observar a diferença existente entre o desempenho das misturas com relação à vida útil dos pavimentos, onde a diferença média entre os valores de N80 a partir de 13 cm de espessura anda na casa dos 40%, explicitando uma diferença significativa entre a eficácia das duas técnicas. Vale ainda ressaltar que tais resultados obtidos pela técnica de reciclagem em central a quente foram obtidos com uma taxa de reciclagem de 30%, podendo essa porcentagem chegar até 70% de acordo com o tipo de central utilizada e com o tipo de mistura a se utilizar. De acordo com o gráfico representado na (Figura 7.5) pode se demonstrar a diferença existente nos módulos de deformabilidade das misturas de acordo com o seu tipo de ligante e sua taxa de reciclagem, valores esses que acabam por afetar diretamente o tempo de vida útil da via. Pode-se observar que à medida que a taxa de reciclagem aumenta ocorre da mesma forma um aumento em seu módulo de deformabilidade e de forma similar também ocorre um aumento do módulo de deformabilidade de acordo com a variação do tipo de ligante betuminoso utilizado, sendo que este crescimento ocorre de acordo com o aumento da rigidez do ligante betuminoso utilizado.

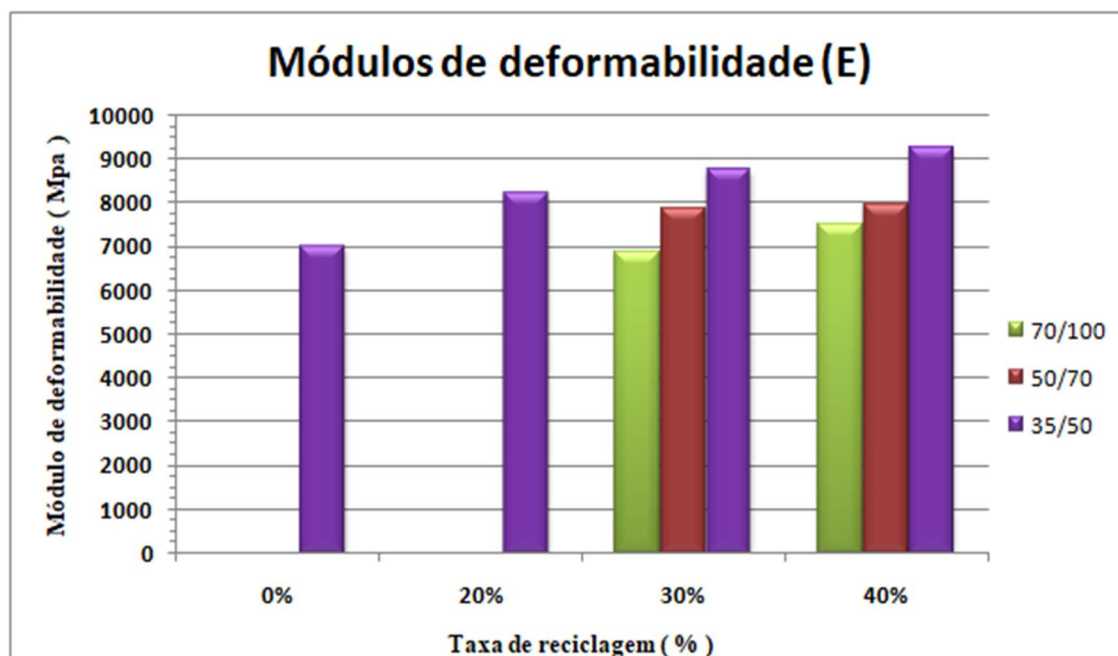


Figura 7.5 – Variação do Módulo (E) de acordo com a taxa de reciclagem e tipo de ligante (Adaptado de BAPTISTA, 2006)

Pode-se concluir que as misturas recicladas em central a quente apresentam um melhor comportamento do que as recicladas in situ com emulsão, isso ocorre devido às questões já citadas anteriormente como um maior controle de produção, maior fiabilidade na execução do processo e também a uma menor suscetibilidade a agentes climáticos. Porém a análise desenvolvida aqui visa simplesmente demonstrar seu comportamento em relação à vida útil de cada tipo de técnica em termos de eixos padrões, o critério de definição de aceitação ou rejeição de determinada metodologia de reciclagem implica em estudos mais complexos, analisando todas as questões já exaustivamente apresentadas neste trabalho. Uma forma de salientar a necessidade de uma investigação mais profunda sobre cada caso em particular é através do gráfico representado na (figura 7.6) onde por meio da sobreposição dos gráficos dos resultados obtidos por meio das simulações feitas pelo JPAV pode se verificar que embora a diferença em espessuras superiores a 13 cm possuem uma diferença relevante em espessuras inferiores essa diferença apresenta um valor reduzido.

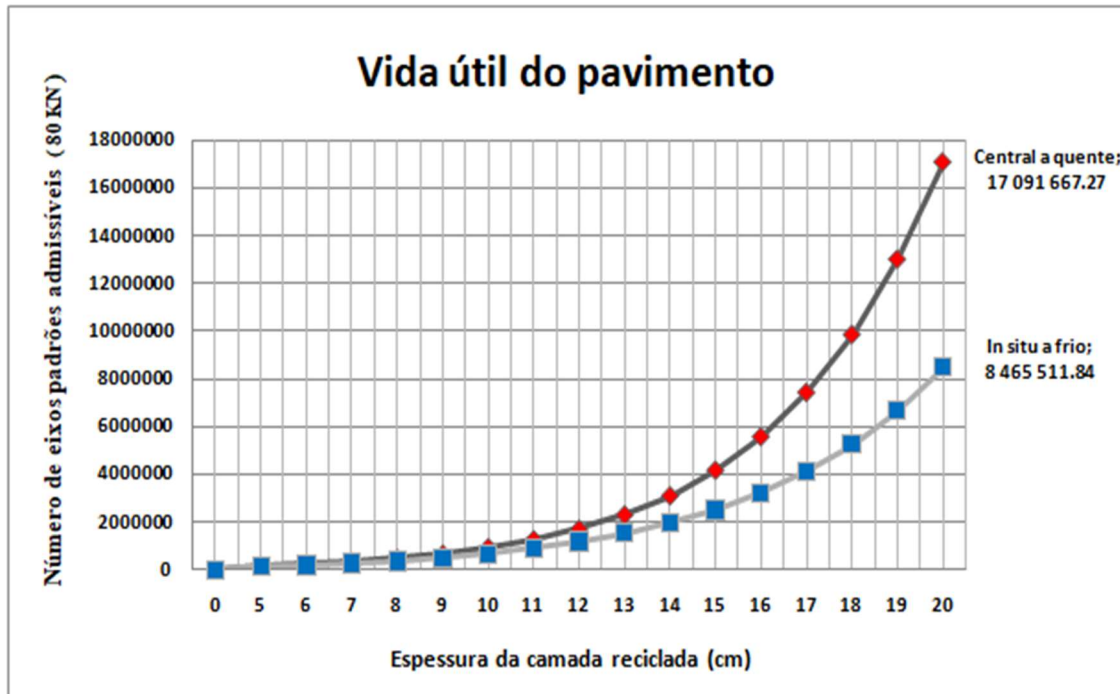


Figura 7.6 – Vida útil dos pavimentos com misturas recicladas (JPAV)

Pode se assim concluir que para vias com baixo volume de tráfego a opção de reciclagem in situ pode ser uma opção mais viável, pois com a redução do volume de tráfego há uma redução na espessura das camadas do pavimento, o que acaba por tornar possivelmente mais eficaz esta técnica haja vista que em espessuras reduzidas apresenta resultados similares com a da reciclagem em central a quente porem com um custo de produção significativamente reduzido.

Com a intenção de fundamentar a importância da avaliação da estrutura da via em todas as suas camadas recorre-se a um gráfico (Figura 7.7) onde é representado um ganho de vida residual da estrutura utilizada como modelo para análise, onde mantido uma espessura 15 cm na camada base em ambos os casos de reciclagem e variando apenas a condição do solo de fundação da via verifica-se um ganho proporcional de vida útil do pavimento à medida que o valor da capacidade de carga do solo aumenta, explicitando a relevância de cada camada num sistema como um todo.

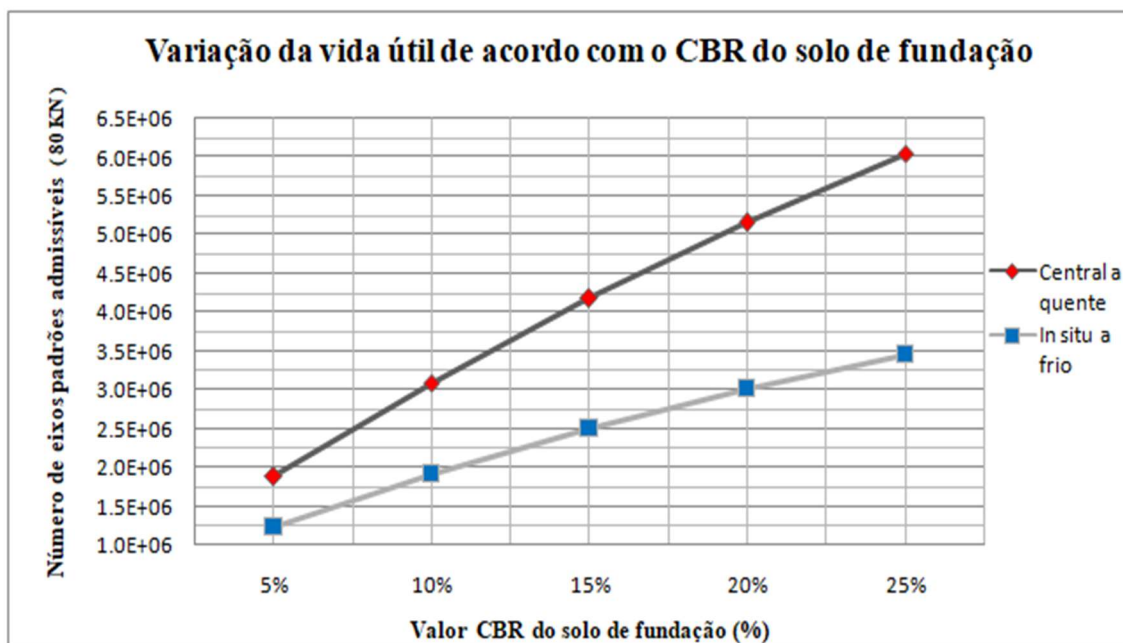


Figura 7.7 – Variação da vida útil de acordo com o CBR do solo fundação (JPAV)

É importante referenciar que o modo de funcionamento de um pavimento rodoviário flexível ocorre de acordo com a junção de todas as camadas que compõem sua estrutura e seus respectivos modos de comportamentos de materiais individuais,

resultando em um sistema mais complexo onde todas as camadas possuem determinada relevância. Embora as avaliações feitas nas análises anteriores busquem apenas caracterizar o modo de comportamento do pavimento com base em critérios de ruína por fadiga variando apenas a camada base onde se aplica a mistura betuminosa reciclada, pode se afirmar que em um caso prático a análise deve ocorrer em todas as camadas que compõem a estrutura da via, dedicando também certa atenção a situação estrutural do pavimento que acaba por se tornar um fator de limitação de uso de determinada técnica de reciclagem ou até mesmo como um fator de indicação de alguma metodologia específica.

7.4. Avaliação econômica (Casos de estudo)

Com a intenção de comprovar a viabilidade das técnicas de reciclagem fase a soluções tradicionais usualmente utilizadas na reabilitação de pavimentos degradados, são apresentados dois casos de estudos (PICADO-SANTOS & PEREIRA, 2006) onde ocorre uma avaliação econômica comparativa entre soluções tradicionais de reabilitação e soluções com a utilização das técnicas de reciclagem. No primeiro caso é feita uma comparação entre uma reabilitação tradicional e uma reabilitação com reciclagem em central a quente, já para o segundo caso de estudo a comparação acontece entre uma solução convencional frente a uma intervenção por meio da reciclagem in situ a frio com emulsão. Os pavimentos analisados possuem estruturas de composição de acordo com as imagens a frente (Figura 7.8 e 7.9) e apresentam as seguintes características:

CASO 1

- ✓ Extensão de 10 km, com duas vias de 8 metros de largura e uma área total de 160 m²;
- ✓ Apresentava fendas com 10 cm de comprimento, desde a camada de desgaste à base.
- ✓ A sub-base e a fundação apresentavam-se em boas condições.

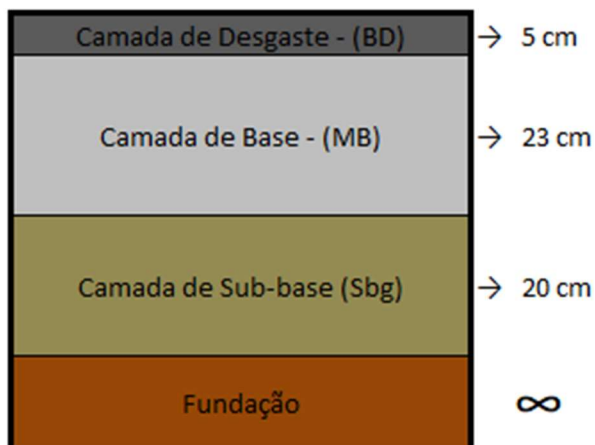


Figura 7.8 – Estrutura do pavimento degradado caso 1
(adaptado PICADO-SANTOS & PEREIRA, 2006)

CASO 2

- ✓ Extensão total de 10 km, com 8 metros de largura, com uma área total 80,000 m²;
- ✓ Pavimento em avançado estado de degradação, possuindo fendas de 26 cm de profundidade.

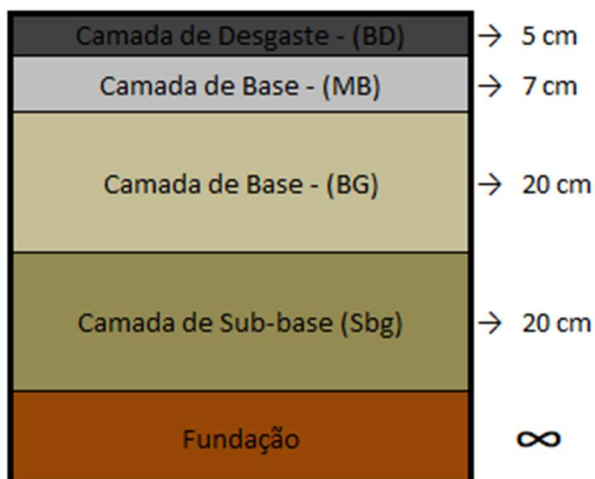


Figura 7.9 – Estrutura do pavimento degradado caso 2
(adaptado PICADO-SANTOS & PEREIRA, 2006)

Para o dimensionamento da solução de reciclagem em central a quente foi considerado uma taxa de reciclagem de 40%, e ambas as propostas de soluções de reabilitação foram dimensionadas com base no método de dimensionamento de pavimentos da Shell.

A seguir são apresentados quadros (Quadro 7.9 a 7.14) que representam as espessuras e custos de cada caso, além de explicitar a diferença existente em seus custos de produção final.

CASO 1

Estrutura do Pavimento	Custo Unitario € / cm / m ²	Espessura	Custo €/m ²
Camada de Desgaste	1.00 €	5 cm	5.00 €
Camada de Base betuminosa	0.48 €	16 cm	7.70 €
Custo da camada betuminosa €/m ²			12.70 €
Área total do pavimento			160 000 m ²
Custo total da camada betuminosa €/m ²			2,032,000.00 €

Quadro 7.9 – Solução Tradicional caso 1
(adaptado PICADO-SANTOS & PEREIRA, 2006)

Estrutura do Pavimento	Custo Unitario € / cm / m ²	Espessura	Custo €/m ²
Camada de Desgaste	0.44 €	5 cm	2.20 €
Camada de Base betuminosa	0.49 €	14 cm	6.86 €
Custo da camada betuminosa €/m ²			9.06 €
Área total do pavimento			160 000 m ²
Custo total da camada betuminosa €/m ²			1,449,600.00 €

Quadro 7.10 – Reciclagem em central a quente
(adaptado PICADO-SANTOS & PEREIRA, 2006)

Custo de reabilitação - Caso 1		
Camada	Solução tradicional	Reciclagem em central a quente
Desgaste	800,000.00 €	352,000.00 €
Base	1,232,000.00 €	1,097,600.00 €
Custo total	2,032,000.00 €	1,449,600.00 €
Diferença de custo	582,400.00 €	

Quadro 7.11 – Diferença entre custo de produção das soluções de reabilitação
(adaptado PICADO-SANTOS & PEREIRA, 2006)

CASO 2

Vale destacar que para o caso 2 para a solução tradicional foi necessária uma aplicação de uma SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer), de modo a reabilitar o pavimento degradado, o que gerou certa influência no respectivo custo final.

Estrutura do Pavimento	Custo Unitario € / cm / m²	Espessura	Custo €/m²
Camada de Desgaste	1.00 €	5 cm	5.00 €
Camada de Base betuminosa	0.70 €	10 cm	7.00 €
SAMI	1.00 €	-	1.00 €
Custo da camada betuminosa €/ m ²		13.00 €	
Área total do pavimento		80 000 m ²	
Custo total da camada betuminosa €/ m ²		1,040,000.00 €	

Quadro 7.12 – Solução Tradicional caso 2
(adaptado PICADO-SANTOS & PEREIRA, 2006)

Estrutura do Pavimento	Custo Unitario € / cm / m²	Espessura	Custo €/m²
Camada de Desgaste	1.00 €	5 cm	5.00 €
Camada de Base betuminosa	0.20 €	15 cm	3.00 €
Custo da camada betuminosa €/ m ²		8.00 €	
Área total do pavimento		80 000 m ²	
Custo total da camada betuminosa €/ m ²		640,000.00 €	

Quadro 7.13 – Reciclagem in situ a frio com emulsão
(adaptado PICADO-SANTOS & PEREIRA, 2006)

Custo de reabilitação - Caso 2		
Camada	Solução tradicional	Reciclagem In situ a frio com emulsão
Desgaste	400,000.00 €	400,000.00 €
Base	560,000.00 €	240,000.00 €
SAMI	80,000.00 €	-
Custo total	1,040,000.00 €	640,000.00 €
Diferença de custo	400,000.00 €	

Quadro 7.14 – Diferença entre custo de produção das soluções de reabilitação
(adaptado PICADO-SANTOS & PEREIRA, 2006)

Para os dois casos apresentados acima foram definidas medidas de reabilitação com soluções tradicionais e soluções ligadas a reciclagem de pavimentos, porém pode-se observar a grande diferença existente entre essas duas modalidades de atuação no pavimento (Figura 7.15), onde as técnicas de reciclagem mostraram uma redução considerável no custo final de fabricação representando grande viabilidade em relação às técnicas tradicionais. No caso 1 a diferença existe na técnica de reciclagem em relação a técnicas convencionais anda por volta dos 30%, sendo que no segundo caso essa porcentagem de diferença assume valores na ordem dos 40%. É essencial destacar também que para estes casos de estudo não foram contabilizados os custos de transporte nem os custos de depósito do material fresado em vazadouro, fator esse que tornaria maior ainda a porcentagem de economias das técnicas de reciclagem de pavimentos em relação às soluções tradicionais.

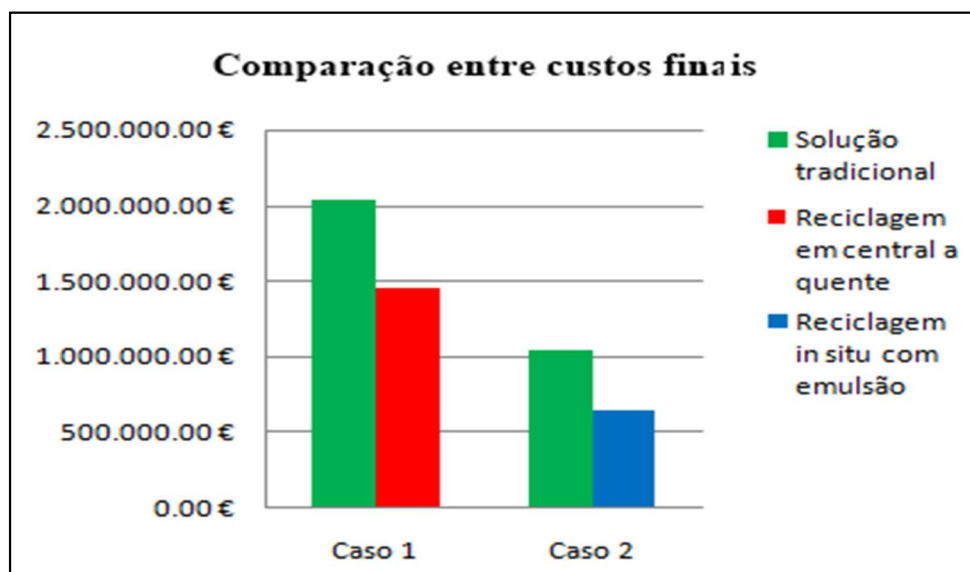


Figura 7.10 – Comparação entre custos finais caso 1 e 2
(adaptado PICADO-SANTOS & PEREIRA, 2006)

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1. Considerações Gerais

De acordo com o estudo realizado por meio deste trabalho, foi possível evidenciar todas as etapas que constituem um processo de reabilitação de um pavimento flexível degradado por meio das técnicas de reciclagem, demonstrando as principais variáveis que influenciam na tomada de decisões em relação a viabilidade da reciclagem como um método construtivo eficiente, e determinando qual a melhor técnica a ser utilizada dentro as várias situações explanadas ao longo do desenvolvimento deste estudo.

Com isso é possível concluir que a determinação da escolha de uma técnica de reciclagem está diretamente ligada com o nível e tipo de degradação em que se encontra o pavimento. Sendo esse, um fator extremamente relevante quanto ao nível de sucesso da intervenção no pavimento, evidenciando o quão imprescindível é um prévio estudo da via a se atuar, expondo suas principais características construtivas, composição e nível de deterioração que se encontra.

Juntamente com isso, foi possível definir um melhor rendimento das técnicas de reciclagem em central a quente e reciclagem *in situ* a frio com emulsão, onde as mesmas apresentam uma gama de soluções superior as demais técnicas estudadas, demonstrando em casos práticos uma redução significativa de custos em relação a soluções de reabilitações tradicionais. Desta forma fica claro as vantagens da utilização das técnicas de reciclagem, pois além de cumprirem com as necessidades exigidas em termos comportamentais para a utilização da via, possibilitam uma redução de custos e também uma melhor utilização de materiais de sua composição, se provando como uma metodologia construtiva em harmonia com o quesito sustentabilidade, que constitui um dos principais interesses da utilização da reciclagem de pavimentos.

Em termos de comportamento mecânico pode-se afirmar que a técnica de reciclagem em central a quente apresentou o melhor resultado em relação a técnica *in situ* a frio com emulsão, sendo essa diferença explicitada em termos de números de eixos padrões admissíveis, sendo a primeira técnica extremamente superior a medida em

que o volume de tráfego é maior, o que é traduzido em maiores espessuras de pavimento. Porém é válido ressaltar que neste método ocorre uma maior emissão de gases poluentes, e que a eficiência desta técnica está diretamente ligada com as distâncias a serem percorridas para a coleta de material fresado e distribuição das misturas recicladas prontas, juntamente com as limitações de taxa de reciclagem que de acordo com o tipo de central utilizada pode chegar somente até 70%.

Já com relação a técnica de reciclagem *in situ* com emulsão a mesma apresenta capacidade de reciclagem de até 100% eliminando a necessidade de zonas de vazadouro ou depósitos. Mesmo apresentando resultados inferiores a técnica referida anteriormente em grandes volumes de tráfego, em situações com um menor volume a mesma apresenta resultados semelhantes, porém a um custo inferior de implantação.

Pode-se assim concluir, que em termos econômicos e de sustentabilidade a reciclagem *in situ* a frio é aquela que apresenta mais vantagens, mas quando se trata de características de melhor desempenho de um pavimento fica evidenciado a superioridade da técnica em central a quente.

Ao fim pode-se dizer que a utilização das técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis é uma metodologia de atuação de pavimentos degradados com elevadas vantagens. Apresenta limitações de utilização em determinadas modalidades de técnica, porém com um prévio estudo da real situação da via e uma devida formulação de projeto de atuação pode-se mostrar como uma opção viável frente as soluções tradicionais, quer seja em termos de comportamento mecânico, econômicos e ambientais.

8.2. Trabalhos Futuros

De acordo com o conhecimento exposto ao longo do desenvolvimento deste estudo, é possível definir como pertinente o desenvolvimento de trabalhos futuros que visem o aprofundamento da utilização das práticas de reabilitação de pavimentos flexíveis por meio das técnicas de reciclagem, sendo eles os seguintes:

- Estudos sobre os reais desempenhos das misturas recicladas produzidas em central semi-quente;
- Avaliação do comportamento *in situ* de pavimentos rodoviários flexíveis reabilitados por meio de técnica de reciclagem;
- Desenvolvimento de misturas betuminosas modificadas com a adição de materiais proveniente de reciclagem (resíduos plásticos, borracha de pneus, óleos automobilísticos, etc.);
- Comparação do impacto ambiental de uma reabilitação em pavimento rodoviário por meio da técnica de reciclagem em relação a uma solução tradicional.

9. BIBLIOGRAFIA

Azevedo, M.; Cardoso, M - *Reciclagem a Quente em Central Betuminosa*. Actas das II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2003. (AZEVEDO & CARDOSO, 2003).

Azevedo, M. - *Construção e Reabilitação de Pavimentos – Reciclagem de Pavimentos*. Documento Base, INIR, Lisboa, 2009. (AZEVEDO, 2009).

Baptista, A. M. - *Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central - Contribuição para o seu estudo e aplicação* - Tese de Doutoramento. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra 2006 (BAPTISTA, 2006).

Branco, F. E., Pereira, P. A., & Santos, L. G. - *Pavimentos Rodoviários (3ª Reimpressão ed.)*. Editora Almedina - Coimbra 2008 (BRANCO, PEREIRA, & SANTOS, 2008)

Brock, J. D. e Richmond, J. L. - *Milling and Recycling* (New edition). Technical paper T-127, ASTEC, Chattanooga, USA 2006 (BROCK E RICHMOND, 2006)

Cunha C. M. - *Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis Diferentes Tipos de Reciclagem*. Tese de Mestrado - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa 2010 (CUNHA, 2010)

Departamento Nacional De Infra-Estrutura e Transporte . *Manual de Restauração de Pavimentos asfálticos (2ª Edição ed.)*. Rio de Janeiro 2006 (DNIT, 2006)

European Asphalt Pavement Association - *Directivas ambientais sobre as melhores técnicas disponíveis (BAT) para a produção de misturas betuminosas*. Tradução da APORBET. Edição da (ISBN 90-801214-9-5), Breukelen, Holanda 1998 (EAPA, 1998)

Estradas de Portugal, S.A. - *Cátalogo de degradações dos pavimentos rodoviários*. Vol. 1 Projectos de reabilitação - Gabinete de Gestão da rede 2008 (ESTRADAS DE PORTUGAL, 2008)

Fonseca, P. - *Reciclagem de Pavimentos Rodoviários*. RECIPAV, Cartaxo, 2002. (FONSECA, 2002).

Francisco, Ana P. S. - *Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis*. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Construção, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Bragança 2012 (FRANCISCO, 2012)

Jiménez, F. E. – *Reciclado in situ com Emulsión. Análisis de su Compartamiento. Comparación Resultados de Laboratorio y Obra*. Actas das II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto 2003. (JIMÉNEZ, 2003).

Laboratório Nacional de Engenharia Civil - E80 - Betumes e ligantes betuminosos. Betumes de pavimentação. Classificação, propriedades e exigências de conformidade Lisboa 1997. (LNEC, 1997).

Lewis, A. J.; Collings, D. C. - *Cold in Place Recycling: A Relevant Process for Road Rehabilitation and Upgrading*. 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa. Africa do Sul, 1999. (LEWIS & COLLINGS, 1999).

Martinho, F. da C. G. - *Estado da Arte, Situação Portuguesa e Seleção do Processo Construtivo* - Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra 2004. (MARTINHO, 2004)

Medina, J. & Motta, L.M.G. - *Mecânica dos Pavimentos*. 2^a Edição, Edição dos autores. Rio de Janeiro-RJ, Brasil 2005 (MEDINA & MOTTA, 2005)

Pereira P ; Miranda V. - *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*. Departamento de Engenharia Civil – Universidade do Minho, Braga, 1999. (PEREIRA & MIRANDA, 1999).

Picado-Santos, L.; Pereira, P. - *Technical-Economical Evaluation of Pavement Recycling Alternatives*. Third Gulf Conference on Roads, 2006. (PICADO-SANTOS & PEREIRA, 2006).

Rodrigues C. M. A. - *Modelos de previsão da degradação de pavimentos: parâmetro IRI*. Tese de Mestrado - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa 2013 (RODRIGUES, 2013)

Seixas, P. - *Reciclagem de Pavimentos com Espuma de Betume – Uma Experiência a Grande Altitude, Cordilheira dos Andes, Peru*. Mota-Engil, Pavimentações, S.A., Porto, 2008.(SEIXAS, 2008).

Wirtgen Group - *Services catalog*. Alemanha, 2003. (WIRTGEN, 2003).

Wirtgen Group - *Cold Recycling Manual*. Alemanha, 2004. (WIRTGEN, 2004).