

CAPÍTULO 3

FUNCIONALIDADES PANORÂMICAS DOS TIPOS DE RECICLAGEM EM RODOVIAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Jéssica Wanderley Souza do Nascimento
Allefy Teles Sampaio
Ana Dayse Costa da Silva
Sabiana Gilsane Mühlen dos Santos
Tallita de Matos da Rocha
Mariana Ferreira Umbelino

RESUMO

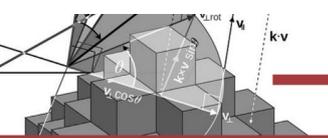
Com o tempo, os pavimentos tendem a se deteriorar devido a cargas excessivas durante sua vida útil, exigindo manutenção e reparos. Uma estratégia para evitar o aumento de custos é a exigência de novos materiais e a promoção do desenvolvimento sustentável na reciclagem de pavimentos asfálticos. O reaproveitamento de materiais, em conjunto com novos agregados e ligantes, pode proporcionar aos pavimentos uma vida útil mais longa e reduzir o impacto ambiental. Este artigo é uma revisão bibliográfica de análise explicativa, que se refere ao método de reciclagem *in situ* a frio, apresentando o conceito, classificação, vantagens e desvantagens da mistura de materiais fresados com outros materiais para promover o desenvolvimento sustentável e a manutenção de rodovias. Os estudos foram selecionados para revisão em diferentes bases de dados, utilizando dos indexadores *Scopus*, *Scielo* e *Web of Science*, publicados entre 2005 e 2015, em português, inglês e espanhol. A pesquisa identificou 145 estudos primários, após a leitura dos títulos, resumos e, tendo em vista os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos, 35 artigos foram incluídos na amostra da revisão explicativa. A leitura analítica foi então realizada para classificar as informações e identificar o objetivo do estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentos flexíveis. Reciclagem. Sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da sua vida útil, os pavimentos rodoviários sofrem processos de degradação sob ação do tráfego e das condições climáticas, tendo-se verificado que nos últimos anos as solicitações a que são sujeitos têm aumentado, quer em termos de volume tráfego, quer em termos da sua agressividade. Paralelamente as exigências dos utentes têm também vindo a aumentar. A necessidade de reabilitar pavimentos surge assim como um imperativo, sendo a mesma consequência da ocorrência de degradações, que podem afetar a qualidade dos pavimentos a diferentes níveis. Esta necessidade crescente de realizar obras de reabilitação dos pavimentos existentes também origina quantidades crescentes e não desprezáveis de materiais disponíveis para uma eventual reciclagem (GEWEHR, 2014, p. 34).

Para além das técnicas tradicionais de reabilitação de um pavimento flexível, a reciclagem dos materiais provenientes dos pavimentos degradados e a sua aplicação nesses ou em outros pavimentos, aparece assim como uma solução alternativa. Esta técnica, para além de permitir a reabilitação das características estruturais de um pavimento flexível, vai também ao



encontro das preocupações atuais relativamente às políticas de desenvolvimento sustentável (CUNHA, 2010, p. 56).

A reciclagem de pavimentos surgiu na década de 70 nos Estados Unidos, numa altura em que o petróleo registava valores muito elevados, traduzindo-se em custos muito elevados de fabrico, transporte e aplicação das misturas betuminosas. Na década de 90 a reciclagem volta novamente a tomar um papel importante, também por razões de ordem económica, mas principalmente devido a fatores de ordem ambiental. A partir desta data, os fatores ambientais passam assumir uma maior importância na escolha do processo de reabilitação de um pavimento. A reciclagem surge como uma solução de resposta às preocupações em relação aos recursos não renováveis e também à deposição dos resíduos provenientes de pavimentos degradados, sendo considerada genericamente como um instrumento da política de desenvolvimento sustentável (DNIT, 2005, p. 78).

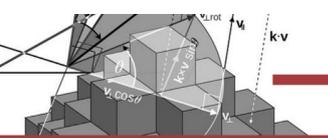
No entanto, a reciclagem de misturas betuminosas só é viável, quando economicamente justificável, sendo cada vez mais importante promover uma aproximação entre problemas ambientais e as soluções técnicas e económicas.

2. SÍNTESE DAS DIFERENTES TÉCNICAS DE RECICLAGEM

Para além das alternativas associadas ao local de reciclagem, existem também diferentes opções função do processo de reciclagem, no que respeita à temperatura de reciclagem e ao ligante utilizado no processo. Da combinação destas diferentes possibilidades resultam diferentes tipos de reciclagem. Assim, é possível ter técnicas a frio, a quente, a semi-quente no que diz respeito a temperatura de reciclagem, e pode-se utilizar cimento, emulsão betuminosa, espuma de betume ou até mesmo novo betume como ligante no processo de reciclagem. A conjugação destas diferentes variáveis dá origem aos diferentes tipos de reciclagem (PINTO, 2009, p. 65).

Todos os tipos de reciclagem, com a exceção da reciclagem *in situ* a quente, constituem uma alternativa de reabilitação das características estruturais de um pavimento flexível degradado. Relativamente a técnica *in situ* a quente, está só pode ser utilizada ao nível da camada de desgaste, em situações em que o pavimento não apresente problemas estruturais. Trata-se por isso de uma técnica de conservação das características superficiais do pavimento (BONFIM, 2005, p. 54).

Foi ainda possível aferir, no que diz respeito à temperatura de reciclagem, que as misturas produzidas a frio, independentemente do local de reciclagem, apresentam



características que lhes permitem ser utilizadas ao nível de camadas de base, contribuindo deste modo para uma melhoria da capacidade de suporte do pavimento. As misturas recicladas a quente em central apresentam características que lhes permitem não só ser aplicadas ao nível das camadas de base, mas também em camadas de regularização e de desgaste, resultado do desempenho aproximadamente equivalente aquele que é verificado para as misturas novas produzidas a quente em central (FONSECA, 2005, p. 76).

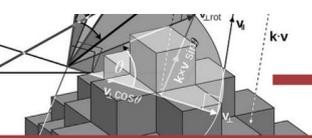
Independentemente do tipo de reciclagem a utilizar, existe sempre a necessidade de se realizarem estudos preliminares, os quais deverão ser acompanhados pela execução de um trecho experimental, em que são considerados aspectos relativos à espessura aproximada da intervenção, materiais a reciclar e a previsão da evolução do seu comportamento ao longo do tempo, a formulação da mistura final a utilizar, de modo a aferir quais as melhores soluções para a reabilitação do pavimento degradado. Para além do local onde se realiza o processo de reciclagem, existem ainda diferentes alternativas no que diz respeito à temperatura de reciclagem e ao tipo de ligante utilizado no processo (CUNHA, 2010, p. 66).

Como resultado das diferentes variáveis que interferem no processo de reciclagem, assim existem diferentes tipos de reciclagem, que permitem a reabilitação de um pavimento flexível (FONSECA, 2005, p. 77).

3. TIPOS DE RECICLAGEM *IN SITU* A FRIO

Na reciclagem *in situ* a frio, as camadas degradadas do pavimento são fresadas, de modo a serem reduzidas a dimensões apropriadas, para depois serem misturadas a frio com um aglutinante, no próprio local da obra. De acordo com o USDD (2005, p. 87), este tipo de reciclagem permite que os materiais provenientes do antigo pavimento, possam ser novamente utilizados numa camada de base do novo pavimento reabilitado.

De acordo com o estudo apresentado por Alkins (2008, p. 56), que compara a quantidade de dióxido de carbono libertado num processo de reabilitação de um pavimento por métodos tradicionais, com um processo de reabilitação que implicou a reciclagem *in situ* a frio de um pavimento, foi possível concluir que a quantidade de gases emitidos é cerca de metade para a solução que contempla a reciclagem do pavimento degradado. Uma vez que se trata de uma técnica a frio, os consumos de energia são menores quando comparados com as técnicas a quente, por não haver a necessidade de aquecer o material. A reciclagem *in situ* a frio apresenta também menores níveis de emissão de gases tóxicos para a atmosfera quando comparada com uma solução tradicional de reabilitação de um pavimento.

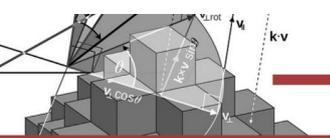


Para analisar a quantidade de CO₂ libertado, foi utilizado um modelo computacional – PaLATE (*Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economics*), que comparou uma solução tradicional de reabilitação com a técnica de reciclagem *in situ* a frio. Foi analisado um troço com a extensão de 1 km com secção transversal de 7,5m, numa profundidade de 15cm (ALKINS, 2008, p. 59).

De acordo com Pinto (2009, p. 65), os resultados obtidos, indicam claramente uma menor quantidade de CO₂ libertado para a atmosfera quando utilizada a solução que implica a reciclagem *in situ* a frio do pavimento. Neste tipo de reciclagem, à semelhança do que acontece com os outros, e tal como se viu no processo de reciclagem, em primeiro lugar há que verificar as condições do pavimento, e se este se encontra em condições de ser alvo do processo de reciclagem. Caso o pavimento cumpra as condições, procede-se à fase de estudo dos materiais que constituem o pavimento e à obtenção de uma fórmula de trabalho para cada um dos trechos com características diferentes. Já na fase de execução, os equipamentos necessários à realização da técnica de reciclagem *in situ* a frio são no mínimo uma máquina recicladora, cisternas para água e ligantes, motoniveladora e cilindros, os quais formam um comboio, frequentemente denominado por “comboio de reciclagem”.

A fase de execução tem início com a passagem em primeiro lugar da máquina recicladora. A máquina recicladora procede de forma contínua à desagregação do pavimento existente, à adição de água e do ligante através de injetores existentes no rotor da máquina, à mistura do material, e finalmente ao seu espalhamento. Se na fórmula de trabalho ficou estabelecido que seria necessário material corretivo, nomeadamente agregados, estes devem ser colocados sobre o pavimento antes da passagem da máquina recicladora, para que quando está passe se proceda às correções estabelecidas (WIRTGEN, 2009, p. 69).

De forma a garantir a homogeneidade da camada reciclada, a máquina recicladora deverá avançar a uma velocidade lenta e uniforme, evitando-se paragens. Quando tal for imprescindível, deverá cortar-se de imediato o fornecimento de ligante e água para evitar sobredosagens ou encharcamentos. O avanço da recicladora está muito condicionado pelas características dos materiais existentes e pela profundidade em causa no processo de reciclagem. Se a reciclagem for feita por faixas, estas devem sobrepor-se, com uma sobreposição mínima de 15cm, tendo o cuidado de desligar os injetores da máquina recicladora nesse comprimento de sobreposição aquando da primeira passagem da máquina, de forma a evitar a sobredosagem de ligante (AZEVEDO, 2009, p. 87).



Depois de colocada a mistura, segue-se a compactação da camada reciclada que de acordo com Nunes (2005, p. 67), deverá ser primeiramente com um cilindro de rolo vibrante e em seguida com cilindro de pneus, e deverá ter início logo após a passagem da máquina recicladora.

Uma compactação final energética é fundamental para obter a resistência necessária e um bom comportamento do pavimento reciclado, pelo que deve alcançar-se a maior densidade possível, sendo recomendado atingir-se no mínimo 90% do Proctor modificado. Uma pequena variação na densidade, por exemplo 5%, traduz-se numa grande variação das resistências mecânicas, que pode significar uma redução da ordem dos 25% (PAUL, 2005, p. 78).

A compactação executar-se-á longitudinalmente de forma contínua e sistemática, até se atingir o grau de compactação pretendido. Se a reciclagem se realizar por faixas paralelas os cilindros deverão sobrepor-se na faixa adjacente em pelo menos 15cm. Se forem utilizados dois equipamentos de reciclagem em paralelo compactar-se-á a toda a largura abrangida pelas duas máquinas (AZEVEDO, 2009, p. 89).

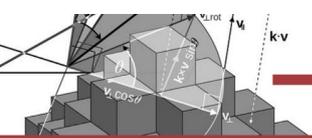
Deve também proceder-se ao nivelamento da camada reciclada, utilizando para tal uma motoniveladora, uma vez que o volume de materiais tratados, após a reciclagem é superior ao inicial, tanto pela quantidade de água e ligante adicionados, bem como pelo empolamento que resulta do processo de desagregação das camadas muito densificadas do pavimento antigo depois de vários anos a suportar a ação do tráfego (ALKINS, 2008, p. 62).

Conforme Pinto (2009, p. 67), a reciclagem *in situ* a frio permite a utilização de diversos ligantes: cimento, emulsão betuminosa e espuma de betume. Dependendo do ligante utilizado, a camada de base reciclada apresentará determinadas características estruturais.

O processo de reciclagem *in situ* terá sempre de ser complementado com a colocação de camadas superiores em misturas betuminosas fabricadas a quente em central, de modo a dotar o pavimento das características superficiais necessárias à circulação do tráfego, daí que este tipo de reciclagem, para além de reabilitar estruturalmente o pavimento, possibilite também a melhoria das características superficiais (BONFIM, 2005, p. 64).

3.1 Reciclagem *in situ* a frio com cimento

Na atualidade, a reciclagem *in situ* com cimento é uma técnica largamente utilizada em países como, Estados Unidos, Austrália, Alemanha, Espanha e França. Em Portugal já foram realizadas algumas obras de reabilitação utilizando esta técnica. Inicialmente esta técnica era utilizada em vias com baixa intensidade de tráfego. No entanto, como resultado da ampla



experiência, entretanto adquirida, atualmente já é aplicada em estradas com um importante volume de veículos pesados (GOMES, 2005, p. 77).

A utilização do cimento permite um grande aumento na capacidade de suporte do pavimento, sem que para isso seja necessário recorrer a uma camada com elevada espessura. A reciclagem *in situ* a frio com cimento é indicada para situações em que o pavimento a reabilitar apresenta degradações com elevada extensão, ou em casos em que existem restrições de subida de cota do pavimento (BONFIM, 2005, p. 78).

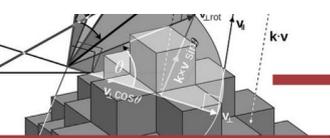
A camada reciclada *in situ* a frio com cimento acaba por constituir segundo Picado-Santos (2008, p. 78), uma camada do tipo agregado de granulometria extensa tratado com cimento e apresenta resistência muito mais elevada que a anterior, passando a estrutura final a ser idêntica a um pavimento semirrígido.

Segundo Fonseca (2005, p. 88), os valores da dosagem de cimento utilizados habitualmente variam em função do tipo de material fresado e do tipo de cimento utilizado, sendo o mínimo de dosagem de 4%. No entanto, de forma a garantir-se uma quantidade efetiva de 4% e atendendo a perdas e deficiências na aplicação, homogeneidade do material existente, ou deficiências na compactação é comum especificarem-se valores mínimos de 6% de cimento. 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. Na fase de execução deste tipo de reciclagem, a sequência construtiva é idêntica à já referida para a técnica *in situ* a frio. No entanto, quando a reciclagem *in situ* a frio utiliza como ligante o cimento, deverá ser acoplado à recicladora uma misturadora.

3.2 Reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa

As emulsões betuminosas podem ser definidas como dispersões, relativamente estáveis, de gotículas de betume convencional (fase dispersa ou descontínua) em água – meio emulsionante (fase contínua). Dessa forma, se obtém um sistema heterogêneo, comportando duas fases líquidas não miscíveis, onde uma das fases se encontra dispersa dentro de outra fase sob a forma de finas gotículas com dimensões entre 0,1 e 5 microns de diâmetro (PICADO-SANTOS, 2008, p. 80).

Em função da carga das partículas do betume, existem dois tipos de emulsões betuminosas, as aniônicas (carga negativa) e as catiônicas (carga positiva). Em termos de rapidez de rotura das emulsões betuminosas pode-se ter rotura rápida, média ou lenta e ainda caracterizar as emulsões em função da sua viscosidade, baixa, média ou alta. Segundo Fonseca



(2005, p. 89), as emulsões mais utilizadas na reciclagem são as catiônicas de rotura lenta, as quais proporcionam um correto envolvimento com os agregados que resultam do processo de fresagem do pavimento antigo e permitem que o espalhamento da mistura se faça antes da rotura da emulsão.

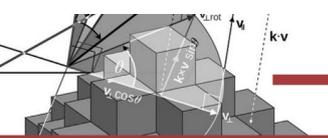
É importante garantir uma boa afinidade entre a emulsão escolhida e o material a tratar, para que no futuro a camada reciclada não apresente anomalias que comprometam o sucesso da reciclagem, daí a importância fundamental de se realizar um trecho experimental, onde é possível testar a adesividade entre a emulsão betuminosa escolhida e o material reciclado, bem como as percentagens de emulsão betuminosa a utilizar. O trecho experimental permite ainda avaliar sobre a necessidade de se proceder à adição de material corretivo (SANTOS, 2008, p. 67).

O valor da dosagem da emulsão betuminosa a utilizar depende da percentagem de betume e da percentagem de finos existente no material reciclado, por serem estes os que apresentam maiores problemas de envolvimento com este tipo de ligante. De acordo com Lewis (2009, p. 95), usualmente utilizam-se percentagens de emulsão de cerca de 5% do peso do material a reciclar, no entanto esta percentagem pode ser reduzida para valores até 3%, em função da percentagem de betume na mistura reciclada.

Este tipo de reciclagem visa sobretudo recuperar camadas de desgaste envelhecidas em pavimentos com valor estrutural adequado às condições de tráfego, abrangendo regra geral a espessura da camada de desgaste, acrescida de 3cm de forma a englobar a interface com a camada adjacente, que seria seriamente afetada pela violenta operação de fresagem (PICADO-SANTOS, 2008, p. 85).

A sequência construtiva da técnica de reciclagem *in situ* a frio com emulsão é semelhante à da técnica com cimento. Também são utilizados “comboios” constituídos por uma máquina recicladora, à qual é acoplada desta vez, uma cisterna para água e outra para emulsão. A máquina recicladora procede à mistura da emulsão betuminosa com o material fresado e com a água, e ao espalhamento desta mesma mistura. Como o teor em emulsão betuminosa é relativamente baixo, existe a necessidade de adicionar água, especialmente se os agregados estiverem secos. Em seguida procede-se à compactação da camada reciclada (COSTA-BAPTISTA, 2006, p. 89).

As espessuras das camadas a reciclar são geralmente de 12 a 15 cm. Não são aconselháveis espessuras superiores devido a problemas de cura da emulsão betuminosa, mas



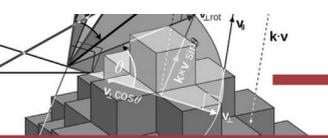
também devido ao aumento dos custos, uma vez que uma emulsão é mais cara que o cimento. Segundo Fonseca (2005, p. 89), quando a espessura da camada a tratar ultrapassa os 12 cm é conveniente juntar uma pequena percentagem (entre 1% a 2%) de cimento. A utilização do cimento em pequenas percentagens pode ter várias funções, nomeadamente facilitar ou acelerar a rotura da emulsão, reduzir a sensibilidade à água, especialmente com materiais argilosos ou contaminados ou aumentar a coesão do material resultante. Este tipo de reciclagem, que emprega dois tipos de ligantes (betuminosos e hidráulicos) é designado por reciclagem mista a frio.

A reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa permite a obtenção de uma camada que segundo Picado-Santos (2008, p. 78), é semelhante a um material de granulometria extensa tratado com emulsão e que de permite alcançar módulos de deformabilidade de 2000MPa correspondentes a temperaturas entre os 20°C e os 25°C. No entanto estes valores dependem do tipo de material fresado (granulometria obtida e natureza dos materiais) e da quantidade de emulsão utilizada, podendo em alguns casos atingir valores da ordem de 5000MPa.

Segundo Batista (2005, p. 99), a utilização deste tipo de misturas com recurso a uma emulsão betuminosa permite a obtenção de uma camada reciclada com maior flexibilidade, e que se adequa melhor, relativamente às camadas tratadas com cimento, quando aplicadas sobre suportes mais ou menos deformados ou relativamente fendilhados. A utilização da emulsão betuminosa, obriga a um período inicial de cura, durante o qual a água vai sendo eliminada e a camada vai ganhando coesão e resistência. Só após este período de tempo é que a camada reciclada com emulsão betuminosa apresentará as características para que foi dimensionada. Daí que a utilização de uma emulsão betuminosa combinada com uma aplicação *in situ* resulte numa grande susceptibilidade da camada reciclada com este ligante às condições climáticas e à variação dos teores em água, pelo que os trabalhos de reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa devem ser realizados preferencialmente na Primavera ou no Verão, de modo a que o período de cura ocorra em situações mais favoráveis.

3.3 Reciclagem *in situ* a frio com espuma de betume

A reciclagem com espuma de betume é um processo de reabilitação de pavimentos que envolve a mistura de espuma de betume com o material proveniente da reciclagem do pavimento existente, produzindo um pavimento de alta qualidade, durável e flexível com um desempenho excepcional e resistente aos efeitos de climas extremos (SEIXAS, 2008, p. 77).



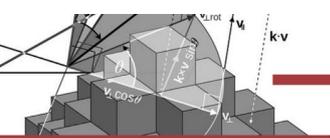
O objetivo do fabrico da espuma de betume é a redução da viscosidade do betume possibilitando o envolvimento dos agregados, ou areias naturais e mesmo argilas com baixa plasticidade. Este tipo de ligante é obtido quando se aquece o betume (a uma temperatura entre 180° C e 200° C) e se injeta em câmaras especiais, uma pequena quantidade de água fria (geralmente 1 a 2% do seu peso) e ar. A introdução de água e ar no betume quente faz com que este se expanda, aumentando até 30 vezes o seu volume inicial (FONSECA, 2005, p. 88).

Esta expansão ocorre na designada câmara de expansão, a partir da qual a espuma de betume é injetada e misturada com o material do pavimento a reciclar. Nenhuma reação química acontece, apenas as propriedades físicas do betume são temporariamente alteradas (BATISTA, 2005, p. 99).

De acordo com Seixas (2008, p. 66), a espuma de betume subsiste durante um período de 10 a 20 segundos, período durante o qual é feita a mistura com o material a reciclar. Enquanto espuma, não reveste completamente a superfície dos agregados, apenas envolve os finos formando uma argamassa, que efetivamente aglutina o material reciclado. A mistura betuminosa final passa a apresentar características particulares pelo uso da espuma de betume. Não apresenta cor preta, como é característica das misturas betuminosas. Apesar de ser necessário o aquecimento do betume, este tipo de reciclagem não é considerado uma técnica a quente, uma vez que a mistura dos componentes (espuma de betume, material fresado e eventualmente aditivos), a colocação, e compactação da mistura são efetuadas à temperatura ambiente. O equipamento necessário à reciclagem *in situ* a frio com espuma de betume, assim como o método construtivo são idênticos aos verificados para a técnica *in situ* a frio e já anteriormente referidos, no entanto, decorrente da utilização da espuma de betume, o “comboio de reciclagem” apresenta algumas alterações que implicam o acoplamento de uma cisterna de água e outra de betume à máquina recicladora.

O betume quente é bombeado desde o tanque de betume até à recicladora, através de mangueiras providas para o efeito e injetado, juntamente com uma determinada quantidade de água, através da barra pulverizadora, localizada na proximidade do rolo misturador. A água, em contacto com o betume quente, provoca a expansão deste formando uma espuma de betume que se mistura com o material do pavimento. Seguem-se posteriormente as operações de nivelamento e compactação da camada (SEIXAS, 2008, p. 78).

A dosagem deste tipo de ligante é de acordo com Lewis (2009, p. 78), utilizado em percentagens que variam entre o 1,5% e 4%. Os valores máximos de dosagem são utilizados



nos casos em que os materiais a tratar são essencialmente granulares, enquanto as dosagens mínimas são utilizadas em situações em que o material apresente elevada percentagem de betume. No entanto, trata-se de dosagens de ligante inferiores àquelas que se verificam para os outros tipos de reciclagem *in situ* a frio, o que leva a que as camadas tratadas com este tipo de reciclagem apresentem uma menor propensão para aparecimento de fendas por retração.

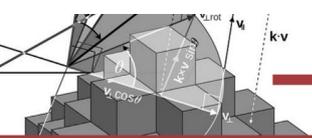
Durante a fase de mistura, a temperatura ideal dos agregados deverá estar entre os 13°C e 23°C, dependendo do tipo de agregado a utilizar, enquanto a temperatura do betume deverá estar entre 180°C e 200°C. Por haver a necessidade de aquecer e manusear o betume a temperaturas elevadas, a reciclagem *in situ* a frio com espuma de betume envolve maiores perigos, relativamente a outras técnicas *in situ* a frio, no que diz respeito à segurança dos trabalhadores em obra. Com estas temperaturas do betume há perigo de queimaduras graves, fogo e explosões. Os módulos de deformabilidade para as camadas recicladas com espuma de betume conseguem valores que de acordo com Fonseca (2005, p. 56), podem variar entre os 2000MPa e os 5000MPa, sendo o valor superior conseguido quando o material a tratar contém material betuminoso, e o valor inferior para situações em que o material a tratar apresente uma granulometria mais monogranular.

A reciclagem mostra ser uma boa alternativa técnica e económica às soluções tradicionais, nomeadamente no que respeita ao saneamento do pavimento existente e à execução de novas camadas (VICENTE, 2006, p. 78).

De acordo com Seixas (2008:89), 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.

4. VANTAGENS E DESVANTAGENS

Conforme Seixas (2008, p. 55), nas situações de reciclagem *in situ*, o processo torna-se geralmente mais económico, por não haver a necessidade de transporte dos materiais, enquanto nas técnicas em central os custos mais elevados são compensados por uma qualidade e fiabilidade das misturas betuminosas obtidas. Mas importa também verificar que outras vantagens e/ou desvantagens apresentam cada uma das técnicas decorrentes do uso de determinado ligante e/ou temperatura de reciclagem e conjugar estas outras variáveis, de modo a ser possível definir em que situações é que cada uma das diferentes técnicas pode ou não ser utilizada como método eficiente de reabilitação de um pavimento flexível degradado.



O material reciclado *in situ* a frio, tal como já foi visto anteriormente, é incorporado no novo pavimento reabilitado, em novas camadas de base, contribuindo deste modo para uma melhoria das características e de comportamento do pavimento, quando solicitado pelo tráfego. Segundo Suleiman (2005, p. 87), o comportamento, em termos de performance das camadas recicladas *in situ* a frio é semelhante a uma mistura betuminosa aberta a frio.

Em casos de pavimentos muito heterogêneos, a técnica *in situ* a frio, não é uma solução viável de reabilitação. Por exemplo, numa situação em que o pavimento a reabilitar possua camadas que ao longo da sua extensão vão apresentando diferentes constituições em termos de materiais, ou diferentes espessuras, tal obrigaria à realização de um estudo de formulação, acompanhado de um trecho experimental para todas as zonas do pavimento com características diferentes, o que do ponto de vista prático não seria razoável (SULEIMAN, 2005, p. 88).

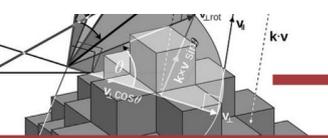
De acordo com o USDD (2006, p. 67), em termos econômicos, os custos associados a uma solução de reabilitação com recurso à técnica *in situ* a frio, com a aplicação de uma camada de desgaste com uma mistura betuminosa produzida a quente, são menores relativamente a uma solução que implique a fresagem do pavimento com a aplicação de uma nova camada com novas misturas betuminosas.

Devido a não ser necessário aquecer o material, a reciclagem *in situ* a frio tem a vantagem de permitir uma redução nos consumos de energia e não emitir gases tóxicos para o ambiente, associados ao aquecimento de misturas betuminosas. No entanto, as misturas recicladas *in situ* a frio de acordo com Jimenéz (2007, p. 89), são difíceis de compactar e por vezes apresentam problemas de desagregação.

5. METODOLOGIA

Este é uma pesquisa de revisão da literatura, o objetivo deste tipo de estudo é sintetizar o conteúdo de vários materiais e analisar criticamente as informações contidas neles. Três plataformas digitais foram utilizadas para a coleta de dados: *Scopus*, *Scielo* e *Web of Science*, com base em estudos publicados entre 2005 e 2015. Os critérios incluíram: artigos com temas tanto em reciclagem de pavimento quanto fresagem *in situ* a frio publicados no período selecionado, em inglês, português e espanhol. Foram adotados os seguintes critérios de exclusão: estudos sobre fresagem *in situ* a quente postados durante um intervalo de 10 anos.

A pesquisa foi realizada no intervalo de tempo de agosto a dezembro de 2020, com os seguintes descritores como fonte: "Pavimentos flexíveis", "Reciclagem" e "Sustentabilidade". Os seguintes descritores foram usados na base de dados *Scopus*, e resultaram em 121 artigos,

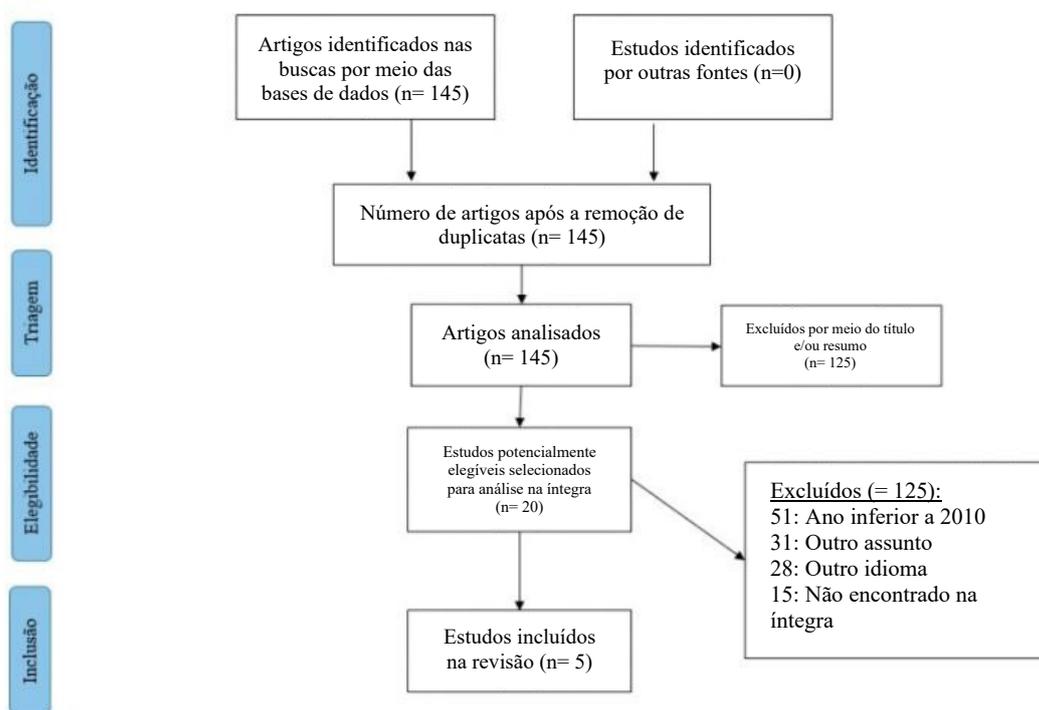


12 dos quais preencheram os critérios de inclusão. Os mesmos descritores foram usados na *Scielo* e no *Web of Science*, e na *Scielo* 10 artigos foram selecionados por título e leitura abstrata. No *Web of Science*, 14 artigos foram selecionados por título e leitura de resumo, 3 dos quais preenchiam os critérios de seleção de acordo com o organograma da metodologia.

Os artigos foram coletados através de acesso on-line, encontrando-se 121 artigos na base de dados *Scopus*, 10 artigos na base *Scielo*, 14 artigos na base *Web of Science*, na qual a amostra final desta revisão explicativa consistia de 20 artigos. Foram utilizadas leituras exploratórias, seletivas, analíticas e interpretativas para a análise e posterior síntese dos dados que preenchiam os critérios de inclusão e exclusão (Figura 1).

Em seguida, os resultados dos estudos foram sintetizados, procurando cobrir sua relevância. Em sequência, os dados dos estudos foram reunidos e sistematizados, caracterizando a análise crítica com o objetivo de gerar novos conhecimentos sobre os diferentes tipos de reciclagem em pavimentos rodoviários flexíveis.

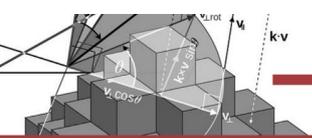
Figura 1: Ilustração representativa do processo metodológico da revisão explicativa da literatura.



Fonte: Autoria própria (2023).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Quadro 1, foi construído a partir do objetivo da pesquisa, tendo em vista apontar os diferentes tipos de reciclagem em pavimentos rodoviários flexíveis.



Quadro 1: Distribuição dos estudos segundo autor, ano, tipo de estudo e resultado.

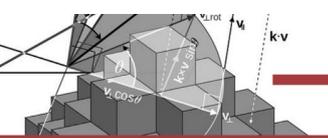
Autor	Ano	Tipo de estudo	Resultado
Suleiman <i>et al.</i>	2005	Estudo Observacional Retrospectivo	Resultados que as camadas recicladas apresentam um elevado grau de rigidez
Paul <i>et al.</i>	2005	Estudo Observacional de Coorte	Resultados que as camadas onde seja aplicada a reciclagem <i>in situ</i> a frio com emulsão betuminosa não apresentam módulos de deformabilidade tão elevados.
Picado-Santos <i>et al.</i>	2008	Estudo Observacional do tipo Transversal Retrospectivo	A utilização de emulsão betuminosa exige um tempo de cura de duas a três semanas.
Simões <i>et al.</i>	2006	Estudo Observacional do tipo Transversal	Trata-se de uma técnica de fácil aplicação, daí a elevada percentagem de utilização.
Batista <i>et al.</i>	2005	Estudo Observacional Retrospectivo	apresentam características de resistência com valores próximos daqueles que são obtidos com cimento.

Fonte: Autoria própria (2023).

Conforme o estudo de Suleiman (2005, p. 67), no caso dos pavimentos reciclados *in situ* a frio com cimento, as camadas recicladas apresentam um elevado grau de rigidez, muito superior à dos materiais que lhe deram origem, o que potencia um aumento da vida residual do pavimento. Assim, esta técnica apresenta-se como uma boa solução quando existe a necessidade de aumentar a capacidade resistente das camadas recicladas. O pavimento que anteriormente era flexível passa a ser do tipo semirrígido. Este problema de retração das camadas recicladas com cimento é ultrapassável com a colocação de uma camada de reforço com betume modificado com borracha, enquanto uma pré-fissuração transversal da camada reciclada antes da compactação constitui a melhor solução.

O estudo de Paul (2005, p. 67), o mesmo relata que as camadas onde seja aplicada a reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa não apresentam módulos de deformabilidade tão elevados, como no caso de o ligante ser o cimento. Trata-se de uma técnica utilizada em situações em que o pavimento se encontre fendilhado, mas com adequado valor estrutural às condições de tráfego. No entanto, as camadas tratadas com emulsão não apresentam os mesmos problemas de fendilhamento por retração dos materiais e conseguem adaptar-se melhor a eventuais deformações. A técnica *in situ* a frio com emulsão betuminosa apresenta maiores custos relativamente à técnica de reciclagem *in situ* a frio com cimento, derivado dos custos mais elevados das emulsões betuminosas, para além de não poderem ser alcançadas as mesmas profundidades de reciclagem devido à cura da emulsão.

De acordo com Picado-Santos (2008, p. 69), a utilização de emulsão betuminosa exige um tempo de cura de duas a três semanas, não devendo nesse período ser aplicada nova camada. A técnica *in situ* a frio com emulsão betuminosa apresenta também, maior sensibilidade às



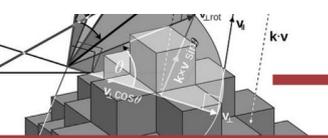
condições climáticas. O tempo seco deve predominar para permitir a rotura da emulsão, pelo que o processo de reciclagem com emulsão está limitado em zonas com elevada percentagem de humidade relativa. As amostras com cimento e mais baixa percentagem de emulsão, tanto para as amostras com agregados virgens como para as amostras com agregados provenientes das misturas betuminosas recicladas, foram aquelas que apresentaram melhores resultados, quando submetidas a ensaios de resistência à compressão.

No entanto Simões (2006, p. 79), relatou que no ano de 2004 já haviam sido reciclados 1.900.000 m² de pavimentos, 43% dos quais através da técnica de reciclagem *in situ* a frio com emulsão. Trata-se de uma técnica de fácil aplicação, daí a elevada percentagem de utilização, que permite reabilitar pavimentos flexíveis degradados, regenerando os materiais betuminosos, transformando-os numa excelente base para o suporte das camadas betuminosas superiores. As misturas betuminosas recicladas *in situ* a frio, após o processo de reciclagem passam a funcionar como agregado em camadas de base do novo pavimento reabilitado, interessa por isso perceber, qual o seu comportamento nestas novas camadas e qual o seu desempenho quando comparados com misturas com agregados virgens.

Por sua vez, Batista (2005, p. 90), utilizou a técnica de reciclagem *in situ* a frio com espuma de betume, uma técnica indicada para situações de tráfego pesado com climas extremos, incluindo situações de altas e baixas temperaturas, gelo, seca e humidade. As camadas recicladas com espuma de betume, apresentam características de resistência com valores próximos daqueles que são obtidos com cimento, no entanto, não apresenta riscos de fissuração por retração, como no caso das camadas recicladas com cimento. As camadas recicladas com espuma de betume são flexíveis, resistentes à fadiga e à deformação. Quando comparada com outros tipos de reciclagem *in situ* a frio, pode-se dizer que a técnica que utiliza a espuma de betume requer algum equipamento muito específico – câmara de expansão, e envolve maiores riscos para os trabalhadores, durante o processo de construção, uma vez que existe a necessidade de aquecer o betume até pelo menos 180°C.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a elaboração do presente trabalho pretendeu-se contribuir para a discussão da utilização de novas técnicas de conservação/reabilitação dos pavimentos rodoviários flexíveis, tendo em consideração que a solução escolhida para a reabilitação de um pavimento flexível degradado deve ter em consideração fatores de índole económica, técnica e ambiental. Nesse âmbito, foi efetuado um aprofundamento dos conhecimentos quanto à possível utilização da



reciclagem dos pavimentos, a qual se subdivide em diferentes tipos de reciclagem, que por sua vez conduzem a diferentes respostas a cada um destes fatores supracitados.

Pode-se assim concluir, que em termos económicos e ambientais a reciclagem *in situ* a frio é aquela que apresenta mais vantagens, mas em termos de desempenho, a técnica a quente em central é aquela que apresenta os melhores resultados, sendo que qualquer uma delas, permite a reabilitação das características estruturais de um pavimento flexível.

REFERÊNCIAS

ALKINS, A.; LANE, B.; KAZMIEROWSKI, T. Sustainable Pavements: Environmental, Economic, and Social Benefits of In Situ Pavement Recycling. **Transportation Research Record**, 2084(1), 100–103. 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.3141/2084-11>> Acessado em: jan. 2023.

AZEVEDO, M.; CARDOSO, M. Reciclagem a Quente em Central Betuminosa. **Atas das II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005, p. 87-92.

BATISTA, F. A. Misturas Betuminosas Densas a Frio. (2004) 240 p. **Tese de Doutoramento em Engenharia Civil**, Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2004. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10216/12322>> Acessado em: fev. 2023.

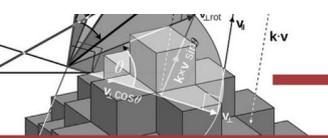
BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. 2 ed., São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2005, p. 54-78.

COSTA-BAPTISTA, A. M. Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central – Contribuição para o seu Estudo e Aplicação. (2007) p. 219 **Tese de Doutoramento em Engenharia Civil**, Departamento de Engenharia Civil – F.C.T.U.C., Coimbra. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10316/7372>> Acessado em: dez. 2022.

CUNHA, C. M. Reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis diferentes tipos de reciclagem. (2010) p. 225 **Dissertação de Mestrado**, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, julho 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.21/425>> Acessado em: dez. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 005/2005** – TER: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia. Rio de Janeiro: IPR, 2005, p. 78.

FONSECA, P. A Reciclagem de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha: A Experiência Americana. **Atas das IV Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos** – Pavimentos Sustentáveis. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005, p. 76-89.



GEWEHR, J. **O que é a reciclagem de asfalto?** fev. 2014, p. 34. Disponível em: <<http://asfaltodequalidade.blogspot.com.br/2014/02/o-que-e-reciclagem-de-asfalto.html>>. Acesso em 17 de fevereiro de 2021.

GOMES, L. S. Reciclagem de Misturas Betuminosas a Quente em Central. **Tese de Mestrado em Engenharia Civil**, Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005, p. 77-79.

JIMÉNEZ, F. E. Manual de Pavimentação. CEPSA Betumes, **CEPSA Portuguesa Petróleos**, S.A., Lisboa, 2007, p. 89.

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, 2009, p. 95. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su142416691>> Acessado em: jul. 2023.

NUNES, A. Guia de Apoio da Reciclagem de Pavimentos com Cimento. **Atas das IV Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos – Pavimentos Sustentáveis**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005, p. 67.

PAUL, I.; SIMÕES, R. Aplicação da Técnica de Reciclagem de Pavimentos in situ com Cimento, na beneficiação da EN383. **Atas das II Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos – Pavimentos Sustentáveis**. Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2005, p. 67-78.

PICADO-SANTOS, L.; BAPTISTA, A. M. **Formulação de Misturas Betuminosas Recicladas a Quente**. 2008, p. 78-85.

PINTO, T. P. **Perda de materiais em processos construtivos tradicionais**. São Carlos: UFSCAR, Departamento de Engenharia Civil, 2009, p. 65-67.

SANTOS, C.; SHULER, S. **A Study of the Performance of Three Asphalt Pavement Rehabilitation Strategies**. Colorado State University, USA, 2008, p. 67-78.

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, p. 66-77.

SIMÕES, L. Pavimentação – Reciclagem Semiquente em Central. **Atas das II Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos – Pavimentos Sustentáveis**. Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2006, p. 79.

SULEIMAN, N. A State of the Art Review of Cold in Place Recycling of Asphalt Pavements in Northern Plains Region. Department of Civil Engineering – **University of North Dakota**, USA, 2002, p. 67-87.

UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE – Standard Practice Manual for Flexible Pavements. USA, 2005, p. 87.

VICENTE, A. M. A Utilização de Betumes Modificados com Borracha na Reabilitação de Pavimentos Flexíveis. **Tese de Mestrado em Engenharia Civil**, Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006, p. 78.