

PRÁTICAS INOVADORAS NA CONSTRUÇÃO DE RODOVIAS E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS TRABALHO DE GRADUAÇÃO UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO

DEANTONI, Caio de Barros¹

MOREIRA, Diego Fernando²

FRANÇOZO, Hélio Junior³

Universidade São Francisco

caio.deantoni@mail.usf.edu.br

diego.moreira@mail.usf.edu.br

¹Deantoni, Caio de Barros, Aluno do Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus de Itatiba - SP;

²Moreira, Diego Fernando, Aluno do Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus de Itatiba - SP;

³Orientador Professor Mestre Hélio Françaço Junior, Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus de Itatiba - SP

Resumo: Os materiais que compõem a pavimentação podem trazer riscos ao bem-estar da sociedade e meio ambiente, contribuindo com a produção de poluentes e influenciando na qualidade do ar devido aos componentes das misturas no processo de pavimentação. Frente a isso, surge a necessidade da busca por elementos capazes de promover a construção de estradas que tenham em sua composição resíduos sustentáveis, com baixo teor de contaminação ou poluição. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo conhecer práticas e materiais inovadores na construção de rodovias. Para tanto, será utilizada como metodologia a pesquisa bibliográfica baseada na literatura sobre o tema. As estradas e rodovias são essenciais à sociedade moderna trazendo consigo seus impactos positivos e negativos. Por isso a sua edificação ou construção deve ser voltada a uma visão sustentável, ou seja, construída sem comprometer o futuro daqueles que virão. O desenvolvimento sustentável deve estar atrelado a proteção ambiental e a construção de uma visão voltada ao meio ambiente e as formas de protegê-lo. Deve-se buscar ferramentas, materiais e técnicas que sejam capazes de auxiliar nas estratégias de cuidado e proteção. O uso de novas técnicas na construção de estradas e rodovias é um passo significativo em direção a práticas mais sustentáveis e eficientes. Muitas das técnicas fazem uso de produtos reciclados, como plástico, asfalto antigo, pneus, dentre outros, promovendo a diminuição de resíduos que são depositados no meio ambiente. Nota-se que se trata de medidas que promovem benefícios ao meio ambiente além de promover melhorias em termos de custos.

Palavras-chave: pavimentação; asfalto; sustentabilidade.

Introdução

O processo de pavimentação mais convencional consiste na utilização de derivados de petróleo, de fração pesada com aglutinante em conjunto com agregados para formar o denominado cimento asfáltico do petróleo (CAP), tendo em vista seu processo de confecção que consiste em aquecer a mistura a temperaturas elevadas para posterior aplicação. É possível verificar alguns impactos destas obras em suas envoltórias utilizando agentes agressivos ao ambiente. Além disso, a construção de rodovias gera uma profunda mudança de ambiente já que envolve grandes movimentações de volumes de terra, desmatamento, geração de ruídos e

emissões atmosféricas, em todas as etapas de seu processo, da construção à sua própria utilização pelos motoristas.

Com essa problemática em mente, este trabalho visa elaborar uma análise das técnicas e metodologias alternativas e inovadoras para a pavimentação de estradas de rodagem, buscando alternativas e práticas que abordem a redução dos impactos gigantescos que estas obras geram em seu ambiente, buscando encontrar metodologias que abracem a ideia de sustentabilidade.

Para alcançar o objetivo proposto, foi feita uma busca na literatura técnica por tais práticas inovadoras focando principalmente naquelas que demonstrem apelo pela sustentabilidade, abordando metodologia com reutilização ou reciclagem de resíduos, redução do consumo energético, seja em sua produção ou na operação logística, e que também tenham o menor impacto negativo possível nas propriedades mecânicas do asfalto, ou ainda que tenham impactos positivos na mesma.

Após a análise das literaturas, os dados mais importantes foram sintetizados na forma de uma tabela com o objetivo de facilitar a análise para definir as abordagens com potenciais promissores para a utilização pelas empresas, concessionárias rodoviárias, prefeituras e especialistas da área de viária para desenvolvimento e evolução dos estudos.

Antes das análises das técnicas, será feito uma contextualização histórica demonstrando a relevância destas para o desenvolvimento da humanidade, uma fundamentalização da metodologia convencional de produção de pavimentação na atualidade, sendo mundialmente aplicada o denominado concreto asfáltico usinado a quente, passando por toda a problemática relacionada com sua produção e das obras rodoviárias.

A história da pavimentação caminha junto à humanidade, englobando questões de povoamento, conquistas territoriais, expansão comercial, urbanização e desenvolvimento como um todo. Bernucci et al. (2006) cita que uma das estradas pavimentadas mais antigas tinha como objetivo a passagem de trenós transportando cargas e não veículos de rodas.

Ainda na construção das pirâmides no Egito em meados de 2600-2400 a.C, havia vias com lajões justapostas em base com uma boa capacidade de suporte, era realizado o umedecimento com água, azeite ou musgo molhado, conforme Saunier (1936).

Ao longo da história da humanidade foram construídas muitas estradas, possibilitando a ocorrência de transporte de mercadorias, veículos e pessoas. Aos romanos foram atribuídas a maior parte do planejamento e da construção viária. No Brasil, em 1560 foi construída uma das primeiras estradas, ligando São Vicente ao Planalto Piratininga, sendo atualmente conhecida como Estrada Velha do Mar, de acordo com Ribas (2003).

Ao longo da história as estradas foram pavimentadas por diferentes materiais, como pedras ou cimentos, além de novos resíduos que vem surgindo frente a necessidade de ampliar novas possibilidades ou estradas.

De acordo com Bitencourt (2023), atualmente no Brasil, a extensão da malha rodoviária é de aproximadamente 1,7 milhões de quilômetros, ficando classificado como quarto país de maior malha rodoviária.

O pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, que é construído sobre a superfície final de terraplanagem, e objetiva a resistência de esforços decorrentes do tráfego de veículos e das variações climáticas. A pavimentação é capaz de proporcionar melhorias aos transeuntes, maior conforto no ir e vir, além de maior segurança e

até mesmo economia, conforme Bernucci et al. (2006).

O pavimento rodoviário pode ser rígido ou flexível e, mais recentemente, vem sendo adotado o concreto de cimento Portland, que possui uma espessura fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes. As placas de concreto podem ser armadas ou não com barras de aço.

Já os pavimentos flexíveis, entre os mais comuns e utilizados estão os pavimentos asfálticos, que são compostos basicamente por agregados e um ligante asfáltico, sendo sua estrutura completa composta por quatro camadas: revestimento asfáltico (composto por camada de rolamento em contato direto com as rodas dos veículos, e por camadas intermediárias ou de ligação), base, sub-base e reforço do subleito.

É inegável a importância das estradas e rodovias à humanidade, por outro lado, também inegáveis são os impactos que geram ao meio ambiente. Durante o período de estudo para a construção de uma estrada, tem-se o diagnóstico de possíveis danos ao meio ambiente e com isso a necessidade de medidas mitigatórias, visando à redução dos impactos ambientais negativos gerados por tal ação, conforme Ribeiro et al. (2018).

Durante a construção de rodovias, podem ser observados diversos danos como, aumento de emissão de ruídos, poeira e gases, assoreamento da rede de drenagem, extinção de vegetação nativa, má qualidade das águas tanto superficial quanto subterrâneas, carreamento de sólidos, comprometimento da vida aquática, perda da biodiversidade devido a fragmentação e isolamento de populações, alteração no cotidiano da população, facilitação das atividades de madeiras ilegais e da ocorrência de desmatamento, possibilidade de acidentes com cargas perigosas com contaminação de rios e lagos, extração ilegal de recursos naturais, dentre outros, conforme Rezende e Coelho (2015).

A pavimentação de rodovias contribui para a produção de potentes resíduos que causam grandes impactos na qualidade do ar atmosférico, causando problemas a serem solucionados. Diante disso, existe a necessidade de avanços tecnológicos e da ciência por meio de materiais sustentáveis, para obter um baixo teor de poluentes.

Ribeiro *et al.* (2018) cita que alguns elementos utilizados na pavimentação, tal como o ligante asfáltico ou cimento asfalto petróleo, são capazes de ocasionar danos ambientais, em virtude da sua composição química e da emissão dos ligantes no ar. Sendo ainda, causadores de degradação ambiental. O Cimento Asfalto Petróleo possui em sua composição uma mistura de hidrocarbonetos (90 a 95%) e heteroátomos de nitrogênio, enxofre, entre outros (5 a 10%). No processo de fabricação ocorre o aquecimento, podendo chegar a temperaturas de até 150°C e durante este processo, hidrocarbonetos que compõem o ligante são emitidos no ar, causando danos a qualidade do ar (RIBEIRO et al., 2018).

O aquecimento intenso da mistura faz com que componente aromático da mistura diminua, resultando em um envelhecimento precoce da mistura, além da liberação de vapores que condensam em fumos de asfalto (BITENCOURT, 2023). Tal processo tem o potencial de causar danos a população que reside nas proximidades em virtude da poluição produzida (RIBEIRO et al., 2018). Algumas misturas também utilizam querosene em adição ao cimento asfáltico que representam um risco para a saúde e para o ambiente pelo seu potencial de lixiviação e contaminação de lençóis freáticos (BITENCOURT, 2023).

Os impactos destas obras têm grande influência nas características de cada rodovia, como largura e uso das faixas de domínio, geometria da via, e também pelas características da

área no qual ela é implantada. São verificados impactos no meio físico e biótico, sendo, que nos meios físicos os impactos são no solo, com a diminuição da resistência e, conseqüentemente, o surgimento ou intensificação dos processos erosivos, sofrendo com os processos de erosão, assoreamento, modificação dos parâmetros físicos e químicos do solo, modificação da superfície geomorfológica e contaminação (BARBOSA, 2018). Os efeitos erosivos podem ser verificados na Figura 1, onde além dos danos ao meio ambiente, também podemos verificar problemas relacionados à própria estrutura da rodovia.

Figura 1: Erosão do solo



Fonte: Erosão: fatores que aceleram esse processo. Disponível em: <https://ejeamb.com.br/erosao-fatores-que-aceleram-esse-processo/>. Acesso em 24 mar. 2024.

Além disso, causa danos às águas superficiais e subterrâneas, em virtude da execução de aterros, pavimentação da via e circulação de veículos. Ainda, a supressão da vegetação gera mudanças no processo de recarga de água subterrânea e com isso a diminuição do fluxo das drenagens naturais, conforme Lins et al. (2019). Ocorre a impermeabilização do solo, diminuição da vegetação na área, e capacidade de infiltração e ampliação da capacidade de escoamento, originando inundações e deslizamentos de terra.

A ocorrência da supressão da vegetação causa impactos ambientais nas etapas da construção, pois nesse momento se impacta diretamente a biodiversidade. O desmatamento na faixa de domínio da via prejudica o fluxo de animais, implicando na fuga da fauna para locais mais seguros e possíveis atropelamentos ao atravessar a rodovia (LINS et al., 2019).

Ainda pode haver o surgimento de vetores de doenças ligadas a ratos e mosquitos, causado pelo acúmulo de lixo e sucatas, que podem desencadear em diversas doenças à população que reside próximo à região, provocando danos à saúde.

A sustentabilidade é uma temática que deve fazer parte de todos os setores, é preciso que haja inovações nos materiais e resíduos, visando melhorias em todos os sentidos, principalmente no que se refere à saúde e a sustentabilidade ambiental.

O desenvolvimento sustentável é chave para a proteção ambiental. Somado ao progresso, o desenvolvimento sustentável é de grande importância para que as pessoas possam usufruir de melhorias ambientais e de bem-estar. Tem se a necessidade de novas possibilidades de desenvolvimento e crescimento, como a expansão da construção de estradas e rodovias, necessários ao tráfego, expansão e exploração dos territórios, do comércio e da segurança de todos, conforme Aquino et al., (2015).

Há a necessidade de que as estradas e rodovias sejam construídas a partir de materiais

que sejam sustentáveis, com baixa potência de degradação, amenizando o impacto destes sobre o meio ambiente. A construção de estradas mais sustentáveis, é uma forma de minimizar os impactos ambientais, diminuindo a aplicação de resíduos com alta taxa de poluição, e tendo como ciência a importância de conhecer melhor os métodos, técnicas e materiais sustentáveis.

O setor da construção civil ao longo dos últimos anos, vem desenvolvendo técnicas e métodos viáveis de sustentabilidade, visando aliviar os impactos ambientais oriundos das obras. Há uma necessidade do uso racional dos recursos, focando em uma indústria da construção civil mais sustentável.

É notável o desenvolvimento na busca pela utilização de materiais reutilizáveis e alternativos, como exemplo a reciclagem que vem se tornando uma opção na construção civil, reduzindo o impacto ambiental e suas despesas, além de assegurar o reaproveitamento dos materiais.

Não é diferente quando se trata dos materiais utilizados para a construção de estradas, a construção de rodovias necessita de uma quantidade significativa de materiais não renováveis. Sendo assim, há a necessidade de que se possa aliar o consumo de recursos naturais renováveis e não renováveis, e as transformações exigidas pela construção civil frente as novas realidades econômicas e ecológicas, conforme Câmara (2019).

Nesse contexto, o uso de resíduos ou materiais precisam ter noções de sustentabilidade, evitando impactos a natureza. Há a necessidade de que se tenha conhecimento quanto ao uso de materiais, sua composição e forma de uso, evitando assim que ocorram novas contaminações e/ou poluição ambiental, de acordo com Oliveira (2014).

A construção de estradas é capaz de impactar tanto a vida das pessoas como meio ambiente. Previamente são realizados estudos de possíveis impactos ambientais (EIA), e embora, por vezes verificados e quantificados os impactos, não são desenvolvidas estratégias mitigadoras, de acordo com Ribeiro et al. (2018).

Os materiais que compõem a pavimentação rodoviária, podem trazer riscos ao bem-estar da sociedade e ao meio ambiente, contribuindo com a produção de poluentes atmosféricos, elevando inclusive a má qualidade do ar em virtude dos componentes das misturas no processo de obtenção do asfalto (RIBEIRO et al., 2018).

Frente a isso, surge a necessidade de que se busquem por elementos capazes de promover a construção de rodovias e estradas, que tenham em sua composição resíduos sustentáveis, que apresentem baixo teor de contaminação ou poluição.

Práticas e materiais sustentáveis na construção de rodovias

A Holanda criou uma estrada sustentável na cidade de Roterdã utilizando plásticos reaproveitados, sendo uma possibilidade para diminuição dos impactos ambientais. Há no país um pavimento em fase de experimento que é capaz de neutralizar os índices de poluição no ar causada pelos veículos automotores. Estes asfaltos são produzidos com o uso de resíduos que possuem capacidade de mitigar em até 19% os gases poluentes emitidos, além de poder absorver 45% dos gases poluentes emitidos por veículos, conforme Teixeira (2019).

Existem muitos materiais capazes de reter a poluição do ar ou pelo menos diminuir os impactos ambientais. Além disso, a aplicação de resíduos sustentáveis na confecção de estradas é imprescindível para se obter um ambiente sustentável, de acordo com Rosa (2017).

O Brasil possui um alto gasto em reparos em rodovias e estradas, sendo importante a substituição da composição dos agregados de pavimentação e a preservação das fontes primárias dos recursos naturais.

Desde o início dos anos 2000, a expansão de um novo cenário, visando a proteção do meio ambiente, vem sendo marcado pelas políticas públicas ambientais. Desde o ano de 2004 vem sendo feito o uso de agregados reciclados em diversas obras e serviços da construção civil.

Os estratos base e a sub-base do pavimento são feitos utilizando o implemento de agregado reciclado, produzido a partir dos resíduos sólidos de construção civil. De acordo com a Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente n.º 307 do ano de 2002, o uso do concreto reciclado pode ser utilizado como materiais secundários para obras residenciais, pavimentação, calçadas, pisos e meio-fio.

Asfalto com Plástico

Outra necessidade é a do desuso do asfalto, pois não é a única forma de recapeamento, além de exigir reparos frequentes. É necessário o uso de materiais mais duráveis e mais ecológicos, dispensando o uso de combustíveis fósseis. Uma alternativa é o uso de concreto, que é menos poluente, tem um menor aquecimento, além de exigir menos reparos. Uma outra alternativa ainda mais viável e ecológica é o uso de plástico reciclado. As vias que utilizam plástico tendem a não apresentar buracos, proporcionando com isso menos acidentes e menos gastos públicos.

O asfalto plástico substitui o betume ou asfalto à base de petróleo por resíduos plásticos, sendo o material prensado em pelotas que variam em sua durabilidade e flexibilidade. Ao misturar pellets de plástico com pavimento fresado quente, ele se funde e age como um aglutinante de asfalto, conforme pode ser visto na Figura 2.

Figura 2: Asfalto Plástico



Fonte: Reciclagem: como o asfalto plástico abre caminhos para o futuro? Ecolink, 2022. Disponível em: <https://ecolinksolutions.com.br/blog/noticias/reciclagem-como-o-asfalto-plastico-abre-caminhos-para-o-futuro>. Acesso em 24 mar. 2024

O uso de resíduos plásticos no asfalto apresenta diversos benefícios, além de ser uma alternativa mais barata. Ele minimiza o desperdício de plástico em aterros, oceanos e rios e reduz a emissão de carbono.

Embora os materiais plásticos sejam comumente destinados a reciclagem, a denominada reciclagem mecânica (onde o material passa por operações físicas para reutilização), o material reciclado possui restrições de uso pelas características de baixa qualidade do plástico (características extremamente variáveis, baixa flexibilidade para cores),

assim sendo, o material reciclado não possui características suficiente para atendimentos todos mercados (AGUIAR & PHILIPPI JR., 1998).

Os plásticos têm tido participação crescente na composição dos resíduos domésticos. Na década de 60 ele não era uma parte significativa da composição, já em 1996 considera-se que ele componha cerca de 11% dos resíduos domésticos coletados em São Paulo (24) e 3% dos resíduos urbanos do Brasil (9). Nos países mais desenvolvidos, a participação do plástico no lixo é maior, devido aos hábitos de consumo (7,13). O consumo de plásticos na Alemanha é de aproximadamente 70 kg/hab./ano, nos Estados Unidos e no Japão 50 kg/hab./ano e no Brasil em torno de 10 kg/ano (2). Como nos países existe a tendência da população querer copiar os hábitos das populações mais desenvolvidas (17), é de se esperar que nestes países haja uma tendência ao aumento do consumo de plásticos e da sua participação na composição do lixo. Na cidade de São Paulo este processo já está bem amadurecido e o lixo já contém uma quantidade de plásticos comparável aos países desenvolvidos.

TRIMBAKWALA (2017) fez um ensaio de desempenho na utilização de resíduos plásticos em adição ao betume na mistura asfáltica para pavimentação, obtendo um ganho expressivo de resistência e durabilidade na pavimentação quando comparado com a mistura convencional. Os materiais plásticos contribuíram como uma adição aglutinante, contribuindo para a vida útil da pavimentação e na redução da demanda de manutenção relacionada a fissuras causadas pela infiltração de água. Seguindo o mesmo raciocínio, RAMOS (2022) verificou o efeito da aplicação de PEAD como modificador no ligante asfáltico, como uma forma de aplicação de materiais que não apresentem requisitos para reciclagem. Em seu desenvolvimento, obteve resultados promissores para o ligante com a adição, aumentando a resistência a fadiga, melhora do comportamento elástico em variação de temperatura, e a deformação permanente. Entre tanto o autor teve dificuldades para obter uma mistura homogênea, sendo necessário mais estudos relacionados.

Países como Reino Unido, Canadá, Europa e Índia, têm utilizado plásticos para a pavimentação. A empresa MacRebur da Escócia, é especialista em asfalto plástico, tendo pavimentado estradas em todo o Reino Unido e participado de projetos na Nova Zelândia, Austrália e África do Sul, que em cada quilômetro de estrada são utilizadas 740.541 sacolas plásticas descartáveis. Na Califórnia, foram repavimentadas três pistas na cidade de Oroville usando pavimentação de asfalto reciclado, e plástico líquido de garrafas de plástico descartáveis.

No Estado de São Paulo, foi desenvolvida pela Concessionária Eixo SP um método sustentável em corredor viário no interior do Estado. Trata-se do uso de embalagens plásticas de alimentos que são utilizadas na camada asfáltica de pavimento da Rodovia Washington Luís (SP-310), na região Central do Estado.

As embalagens plásticas de alimentos são obtidas junto as Cooperativas de Reciclagem de Lixo. Estas embalagens são moídas e passam por um tanque de lavagem para eliminar qualquer contaminação, posteriormente são aglutinadas até tornarem-se uma massa plástica, que toma formato de pequenos grãos de plástico do tamanho de uma ervilha. Estes grãos de plásticos são misturados com pedras dentro de um grande tambor aquecido a altas temperaturas, até atingirem a consistência ideal.

Foi realizada a pavimentação de um quilômetro da rodovia Washington Luís, entre Rio Claro (SP) e São Carlos (SP), utilizando o chamado GreenFlex®, desenvolvido pelo Centro de

Soluções de Engenharia da Stratura Asfaltos. Este material apresenta durabilidade três vezes maior do que a de um asfalto convencional. Para o trecho de pavimento foram utilizadas 30 toneladas de asfalto modificado com polímero, produzido com 450 kg de plástico reciclado, o equivale a uma quantia de 200 mil unidades de embalagens recicladas (DELIBERALLI, 2023).

Bioasfalto

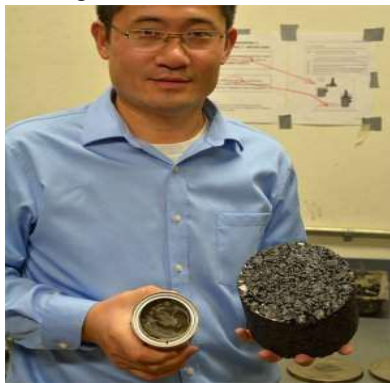
O bioasfalto apresenta benefícios em termos de durabilidade e resistência às variações de temperatura. O bioasfalto permite que a mistura à base de petróleo seja substituída parcialmente por óleos derivados da biomassa de diversas plantas e árvores.

O bio-óleo utilizado no bioasfalto é originado do processo termoquímico chamado pirólise rápida. São utilizados talos de milho, resíduos de madeira ou outros tipos de biomassa, que são aquecidos em um ambiente sem oxigênio, originando um óleo vegetal líquido que pode ser usado para a fabricação de combustíveis, produtos químicos e asfalto. Ainda, é produzido um produto sólido chamado biocarvão que pode ser utilizado para o enriquecimento do solo e para a remoção dos gases do efeito estufa da atmosfera.

A Holanda realizou a construção da primeira rodovia do mundo pavimentada com bioasfalto, são 250 metros da rodovia 987 entre as cidades de Siddeburen e Wagenborgen, no norte do país. A técnica usada visa uma redução significativa de CO₂ na construção de estradas, em substituição ao betume, composto altamente poluente de origem fóssil (GOTTEMS, 2021).

Na Universidade do Estado de Washington nos Estados Unidos, Haifang Wen, utilizou óleo de cozinha usado, para um processo termoquímico na criação do bioasfalto, conforme pode ser visto na Figura 3.

Figura 3: Haifang Wen e bioasfalto com óleo de cozinha



Fonte: Bioasfalto sustentável é feito com óleo de cozinha usado. Disponível em:

<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=bioasfalto-sustentavel-oleo-cozinha-usado&id=010125140310>. Acesso em 24 mar. 2024.

Em seu trabalho verificou-se que a adição de bioasfalto ao ligante comum trouxe uma redução proporcional a adição na resistência, e em várias propriedades do asfalto. Entretanto, embora os resultados obtidos não tenham sido promissores, a mistura ainda atendeu os requisitos de resistência para sua utilização em pavimentação, principalmente quando utilizado na proporção de 10% em massa de ligante na mistura PG 78-22, onde se obteve os melhores resultados. Além do mencionado, vale ressaltar que a mistura obteve uma boa avaliação quanto a utilização em baixas temperaturas, obtendo uma deformação melhor que o asfalto convencional (WEN, 2013).

Na busca de bioligantes com resultados diferentes, BRITO (2023) está elaborando uma mistura de bioligante com origem nacional, produzido através da pirólise de fibras de coco, resíduo muito comum em várias regiões do país.

Cimento Asfáltico de Petróleo de Alta Penetração

O Cimento Asfáltico de Petróleo de Alta Penetração - CAP Pro AP é desenvolvido pela Petrobrás e teve sua venda autorizada pela Agência Nacional do Petróleo. Trata-se de um tipo de asfalto mais sustentável de alta penetração da faixa 70/85, que permite a aplicação de até 30% de conteúdo de asfalto reciclado. O CAP Pro AP possui menor rigidez e composição química ajustada, capaz de auxiliar na renovação de asfaltos envelhecidos, possuindo amplo uso na reciclagem de pavimentos e eliminando a necessidade do uso de agentes rejuvenescedores, por vezes de elevado custo. O produto possui propriedades adequadas para a composição de insumos para a produção de asfaltos de alto desempenho para rodovias, como Asfaltos Modificados por Polímeros e Asfaltos-Borracha, facilitando ainda a produção de Emulsões Asfálticas e produtos para impermeabilização (PETROBRAS, 2009).

Além do incremento da utilização de resíduos na mistura, o produto também tem uma redução no ponto de amolecimento da composição para 44°C, enquanto no asfalto convencional (referência ao 30/45) é acima de 52° C, o que se estima ser capaz de reduzir as emissões de 110 kg de CO₂ para a aplicação de uma tonelada do CAP, sendo uma boa prática pelo seu apelo ambiental e econômico (BITTENCOURT, 2023).

***Reclaimed Asphalt Pavement* – Pavimento Asfáltico Recuperado - RAP**

O RAP consiste na moagem ou demolição de camadas asfálticas antigas, transformando-as em um recurso para ser reaproveitado em novas obras viárias. Ocorre o processo de recuperação de material asfáltico proveniente de pavimentos desgastados. As camadas antigas são trituradas e processadas para tornarem-se parte integrante de novas construções viárias.

O RAP proporciona benefícios a sustentabilidade ambiental, além de benefícios em termos técnicos, econômicos e sociais. Ao reutilizar o material asfáltico, diminui-se a quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários, e minimiza-se o impacto ambiental associado à extração de novos materiais para pavimentação.

A utilização do RAP permite que o material mantenha as propriedades técnicas, contribuindo para a durabilidade e resistência das novas camadas asfálticas, permitindo ainda maior flexibilidade, reduzindo a propensão a trincas e fissuras, e conseqüentemente prolongando a vida útil das rodovias.

O uso do RAP reduz os custos associados à aquisição de novos materiais e ao tratamento de resíduos, sendo uma alternativa econômica e sustentável para a construção e manutenção de estradas.

O projeto que utilizou o RAP nas obras de conservação do Polo Rodoviário Pelotas, foi reconhecido na categoria “Atmosfera: Descarbonização e Economia Circular” do GRI Infra Awards, uma premiação do mercado de infraestrutura brasileira que leva em consideração os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU. O projeto do curso de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, utilizou 176 mil toneladas de mistura asfáltica em

cerca de 340 quilômetros de rodovias.

Almeida (2021) estudou a influência de RAP para a construção de pavimento base de rodovias alternando a proporção de utilização do RAP e verificando o impacto da adição de cimento na mistura para a avaliação do impacto na resistência. Seus resultados chegaram à conclusão que, apenas com o RAP na mistura, não possuía viabilidade técnica por não atender os requisitos de resistência mínima, sendo que a mistura com 50% e 70% ainda poderiam ser utilizadas como sub-base para estradas. Com a utilização de cimento em diferentes teores, a mistura teve resultados promissores utilizando uma composição com 50% de RAP, ainda assim o autor salienta a necessidade verificar as especificações normativas do projeto.

Asfalto espumado

O Asfalto espumado ocorre com a injeção de ar e água na temperatura ambiente no Cimento Asfáltico de Petróleo, aquecido a aproximadamente 175°C. O asfalto espumado permite a reciclagem a frio de resíduos sólidos, quer seja do material fresado ou do resíduo da construção, para uso como camada de base espumada. A técnica começou a ser desenvolvida na década de 50, com o Dr. Ladis H. Csanyi (Universidade do Estado de Iowa – EEUU), utilizando a injeção de vapor na mistura asfáltica. Na década de 60 a empresa Mobil Oil desenvolveu uma técnica com a utilização de água à temperatura ambiente, simplificando o processo (Thenoux, G., & Jamet, A., 2002). O processo é simples pois utiliza de conceitos de termodinâmica básica para aplicação, devendo se ter cuidado com a quantidade de água utilizada no processo, que deve ser ideal para conseguir a expansão desejada, porém sem interferir na coesão da mistura. Com base no mencionado, a técnica tem ganhado espaço atualmente, tendo em vista redução de emissões (GONZALES REMOND, 2017).

GONZALES REMOND (2017), fez um estudo comparativo entre a técnica do asfalto expandido e o método convencional, os resultados apresentados demonstraram que a técnica apresenta tanto a redução de consumo de combustível, devido à redução de temperatura do processo, bem como melhoras na qualidade do pavimento apresentando um incremento na estabilidade, maior trabalhabilidade para aplicação e transporte, e uma redução de custos de processo.

No ano de 2020 a companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - Sabesp, investiu na implantação de uma usina de reciclagem, que tem como objetivo transformar os resíduos provenientes da abertura de valas e de fresagem em base espumada para recomposição das valas.

Asfalto borracha

A reutilização de pneus vem sendo uma das alternativas adotadas nos materiais de pavimentação, apresentando baixo custo e diminuição da poluição ambiental. Podem ser citados ainda como benefícios, a diminuição no desgaste dos pneus dos carros, ruídos de tráfego, resistência à deformidade causada por altas temperaturas e capacidade 16 vezes superior a desgaste em relação aos convencionais.

O uso das borrachas oriundas do descarte de pneus se dá como componente dos materiais ligantes da mistura asfáltica, ou borracha asfáltica, ou como concreto asfáltico modificado pela adição de borracha. Em regra, são utilizados cerca de mil pneus por cada mil

metros de asfalto construído com uma pista de mão e contramão (PIVOTO, 2015).

Os pneus que seriam descartados passam por um processo de moagem se tornando um produto nobre para a pavimentação asfáltica. Esta técnica vem sendo utilizada desde 1963 por Charles Henry nos Estados Unidos, que já naquele período elaborou análises quanto às condições de resistência e durabilidade. Na mesma década, o engenheiro pesquisador Charles McDonald foi em busca de materiais asfálticos que possuísem flexibilidade satisfatória, que ao adicionar borracha em proporções acima de 15% de massa verificou-se que satisfazia a demanda de elasticidade do asfalto (BITENCOURT, 2023).

No Brasil o uso do material começou em meados de 1999, sendo nesse momento utilizado como material de aperfeiçoamento da qualidade do asfalto tradicional. Bernucci *et al.* (2008) relata a primeira aplicação de asfalto modificado no Brasil em agosto de 2001, na BR-116/RS.

Ao comparar as características da pavimentação tradicional e da pavimentação proveniente de borracha de pneus, observa-se que o pavimento com asfalto borracha apresenta considerável resistência aos trincamentos e as alterações que normalmente surgem nos pavimentos tradicionais. O asfalto derivado de borracha apresenta resultados satisfatórios, aumentando os níveis de qualidade do pavimento, maior vida útil, diminuindo as despesas de manutenção do asfalto, aperfeiçoando as propriedades do ligante, ampliando a sua capacidade de resistência a possíveis acúmulos de precipitação, deformações permanentes e ao manifestação/surgimento de trincas e ou fissuras por fadigas e de contrações térmicas, influenciando diretamente nos custos de transporte nacional, resultando na diminuição das despesas com manutenção.

Pavimentação fotocatalítica

Esta técnica consiste na fabricação de peças de concreto pré-moldadas, onde aplica-se uma camada de argamassa com quantidades de um semicondutor, sendo comum o uso de dióxido de titânio por possuir uma melhor eficiência fotocatalítica, que com a captação de luz é capaz de fazer a fotodegradação dos óxidos de nitrogênio (NOx), poluentes comuns em emissões veiculares. A pavimentação fotocatalítica tem na sua base o dióxido de titânio, sendo capaz de absorver de 45% a 90% dos gases poluentes, dependendo das características das peças e condições ambientais (MELO, 2011).

O principal problema encontrado nesta prática é que muitos autores alegam que há uma considerável perda desta propriedade ao decorrer do tempo, oriundo do desgaste e da contaminação da superfície (ROSSO, 2019).

Em busca de uma solução para a problemática, Rosso (2019) fez um estudo da aplicação de partículas de resíduo de vidro, em aplicação na mistura de argamassa translúcida atuando em conjunto com a foto catalisadora, visando uma melhora na eficiência e durabilidade da fotodegradação das emissões atmosféricas. Seus resultados demonstraram que a adição de partículas de vidro de diâmetro médio de 4,8 e 9,5 mm, afetaram positivamente a fotodegradação em eficiência e durabilidade, entretanto, a adição das partículas de vidro influenciou negativamente as características de resistência do material por ter baixa adesividade a mistura, porém ainda atendendo requisitos mínimos de resistência solicitados para a fabricação de bloquetes de pavimentação. A incorporação de resíduos de vidro no material

variou de 0 a 65%, sendo os melhores resultados obtidos com proporções de 46 a 47%, verificando que esta adição melhorou a longevidade das peças como foto catalisadores. Outra vantagem deste método de pavimentação, por se tratar de bloquetes, é a ampla gama de usos no ambiente urbano, podendo ser usados tanto para o passeio, leito carroçável como também em praças.

A adição de vidro demonstra uma boa prática para a aplicação destes resíduos, na perspectiva que a reciclagem de vidro em alguns casos acaba sendo inviabilizada pela dificuldade e custo do processo de reciclagem, sendo descartados como outros resíduos sólidos urbanos (VEIGA, 2023).

Asfalto permeável

O asfalto permeável funciona como um sistema de drenagem que permite captar água da chuva e armazená-la em galerias pluviais, conforme Figura 4. É composto por uma camada de asfalto poroso que permite que a água passe, já a segunda camada é composta por um material drenante, geralmente britas. Uma tubulação é colocada para direcionar a água absorvida a um destino viável.

Figura 4: Comparativo asfalto permeável x asfalto convencional



Fonte: Asfalto permeável: o que é e quais são as vantagens. Disponível em: <https://neoipsum.com.br/asfalto-permeavel-o-que-e-e-quais-sao-as-vantagens/>. Acesso em 24 mar. 2024

O asfalto permeável permite que a água que cai sobre o asfalto, infiltre e fique retida no mesmo, proporcionando um menor fluxo de água no sistema de drenagem, ajudando a combater enchentes e alagamentos. Possui ainda como benefícios uma maior aderência dos pneus, redução dos riscos de aquaplanagem e distância de frenagem, melhor visibilidade noturna dos sinais verticais, e menor reflexão luminosa dos faróis durante as chuvas (BITENCOURT, 2023).

Luiz, *et al.* (2020) e Pires, *et al.* (2018), analisaram a viabilidade dessa técnica para a redução do escoamento superficial para a redução de inundações, eles mencionam uma significativa redução no coeficiente de escoamento superficial, com um processo de produção particularmente semelhante ao convencional, demandando apenas a aplicação de uma impermeabilização sob o pavimento. Ambos também mencionam que, além da prevenção da aquaplanagem, há também a possibilidade de redução na geração de ruídos, porém salientando a redução na resistência do pavimento, devido a sua porosidade.

Resíduos de construção

O concreto reciclado é recuperado da construção civil, e proporciona a diminuição de

resíduos produzidos nos canteiros de obras e a utilização da matéria prima original, além de apresentar resistência e durabilidade.

Os resíduos de obra podem ser reaproveitados se receberem tratamento correto. Suas aplicações podem ser em bases e sub-bases de pavimentação, blocos de concreto para vedação, guias e sarjetas, sendo uma alternativa ao uso de areia e brita. O resíduo trabalhado pode ser visto na Figura 5.

Figura 5: Resíduos de obra na argamassa do concreto



Fonte: Classificação do Entulho. Disponível em: <https://transponteslocacoes.com.br/blog/classificacao-do-entulho/>. Acesso em 24 mar. 2024

O uso de agregado reciclado em estratos de pavimentação tem mostrado vantagens, utilizando quantidades significativas de material reciclado, apresentando facilidade nos processos de execução do pavimento e de produção do agregado reciclado. O uso destes materiais colabora para a diminuição dos gastos, contribui para a utilização dos mais variados materiais e componentes dos resíduos de construção, e favorece a propagação dessa maneira de reutilização, conforme segundo Malta, Silva e Gonçalves (2013).

No Distrito Federal os resíduos da construção civil são coletados pelo Serviço de Limpeza Urbana, o material bruto é processado, tratado e reaproveitado, se transformando no agregado britado (indicado para nivelar estradas, entre outras utilizações). Em Manaus – AM – Valença, *et al.* (2011) fez um estudo para a utilização de areia de RDC (Resíduos de Construção e Demolição) junto com o CAP 50/70 com o intuito de aproveitamento do resíduo, incrementando a resistência do asfalto da região. Também foi feito um estudo da aplicação de fibras do açaí em adição no CAP 50/70 com o objetivo de incrementar a resistência. Para seus ensaios, foi feita uma comparação da mistura convencional com aditivos (SBS e EVA), e com a adição do resíduo mais aditivos. Os resultados demonstraram que a utilização do RDC na mistura obteve um incremento na resistência do asfalto, já as fibras do açaí não tiveram um resultado positivo esperado, incrementando a resistência a tração da mistura, porém quando utilizado juntamente com o RCD o asfalto atendeu os requisitos necessários.

Outra prática de reutilização de resíduos foi na utilização de resíduos de madeira e borracha (oriundos da construção civil), para pavimentação com aplicação no ligante por via seca, para pavimentação urbana na cidade de Macapá – AP – tal prática não gerou dificuldades de aplicação, e de acordo com os autores o trecho experimental se encontra sem danos após 50 meses de uso (COELHO, 2021).

Geocélula

A Geocélula é uma tecnologia de estabilização do solo e de reforço da estrada. Trata-se de uma solução geossintética em favo de mel 3D feito por uma liga nano-polimérica, apresentando como benefícios a alta rigidez, resistência à fadiga e maior vida útil. Materiais comuns na confecção da Geocélula são o polietileno de alta densidade, polietileno ou polipropileno (ROQUE, 2017). A Figura 6 demonstra a aplicação da Geocélula em um trecho de rodovia.

Figura 6: Geocélula



Fonte: Geocélulas. Disponível em: <https://www.ntcbrasil.com.br/ntc-techne/geocelulas/>. Acesso em 24 mar. 2024

A Geocélula permite a estabilização do solo fraco e fornece mais vantagens nas áreas de engenharia, ambientais e econômicas. A aplicação deste material, feito de um composto fibroso tem o objetivo de melhorar a resistência a tração de solo, assim melhorando a resistência a deformação, aumentando a ductibilidade e reduzindo a perda de resistência mecânica do solo de uma forma geral (ROQUE, 2017).

Roque (2017) em seu trabalho fez a análise da aplicação de Geocélula de fibras de polietileno lisas e corrugadas, para a aplicação na base de pavimentos de solos de baixa resistência, foi constatado que a aplicação do material em comparação com o solo sem a aplicação obteve uma resistência a deformação maior, no caso em cerca de 70%, observando ainda que a aplicação de fibras corrugadas tem um melhor comportamento quando comparado com as fibras lisas. O autor acrescenta também que o desempenho das geocélulas em carregamentos baixos é inferior ao solo natural, porém a partir de certo ponto de carregamento, o sistema se inverte, e as geocélulas começam a atuar positivamente na resistência do solo oferecendo maior tenacidade ao sistema.

Em Israel o reforço sustentável de estradas com as geocélulas reduziu a camada de asfalto em 23% e a de preenchimento em 37%. A rodovia *Cross Israel* é uma via de pedágio nacional com 140 km que atravessa o longo corredor norte-sul do país. O uso da geocélula na construção de uma terceira faixa em cada direção visava reduzir o custo do preenchimento e do asfalto, além de manter o desempenho a longo prazo. A geocélula serve como uma camada intermediária de reforço no pavimento superior diretamente abaixo do asfalto, aumentando a capacidade de suporte e estrutura do pavimento.

As Geocélulas são uma alternativa para a sustentabilidade, exigindo uma menor quantidade de agregado para o preenchimento do que as soluções convencionais, utilizando materiais reciclados, reduzindo o uso de equipamentos de transporte e de terraplenagem, permitindo assim a redução do consumo de combustível, contaminação e a emissão de carbono.

Asfalto frio

O asfalto frio tem seu processo de fabricação semelhante ao do asfalto quente, sendo as duas misturas compostas por britas, pó-de-pedra, ligante asfáltico e *filler*. Na fabricação do asfalto frio não é usado o Cimento Asfáltico de Petróleo, sendo utilizada uma forma dispersa do CAP em fase aquosa contendo aditivos, chamada de emulsão asfáltica. A principal diferença é que na mistura a frio, o asfalto como o nome sugere, não há a necessidade de aquecimento da mistura para sua utilização, sendo que sua aplicação envolve uma emulsão em ação conjunta com a água.

O asfalto à frio pode ser classificado como: Pré-Misturado a Frio (PMF) onde a mistura é executada em uma usina apropriada para a produção em condições de controle adequada; Areia Asfalto a Frio (AAF), onde pode não haver a presença de *filler* na mistura; Lama Asfáltica, onde a mistura contém agregados, *filler*, emulsão asfáltica e água são misturadas no local de aplicação. Os dois últimos tipos não possuem características de alta resistência, sendo mais adequados para regularização, ou aplicação em pavimentos de vias secundárias ou selante.

O PMF, pode ser classificado por seu volume de vazios: PMF aberto tem maior volume de vazios e é mais indicado para camadas de base, ou regularização devido à baixa resistência, e o PMF denso que possui característica semelhante a mistura quente. O PMF possui limitações de aplicação quanto a temperatura, que não pode ser inferior a 10°C e dias de elevada umidade (BROCHADO, 2014).

O asfalto frio é utilizado para a reparação de pavimentos asfálticos que sofreram desgaste ao longo do tempo, sendo facilmente aplicável. É extremamente resistente à erosão e à água devido aos hidrorrepelentes.

Além disso, os produtos utilizados na pavimentação do asfalto convencional não fazem parte da composição do asfalto frio, tornando-o assim inofensivo para as pessoas que fazem a aplicação e eliminando seus riscos à saúde e bem-estar.

Se realizarmos uma comparação entre o asfalto quente e o asfalto frio, o asfalto quente é mais durável, mais resistente à água e tem uma aparência mais uniforme do que o asfalto frio. Enquanto em desvantagens ao asfalto frio, o asfalto quente deve ser aplicado em temperaturas altas, o que pode ser difícil em climas frios, levando mais tempo para curar do que o asfalto frio e apresentando risco de incêndio.

O asfalto frio apresenta vantagens em relação a sua aplicação, podendo ser aplicados em temperaturas mais baixas e com ferramentas manuais, o que o torna uma solução mais rápida e fácil para pequenos reparos, além de ser mais barato do que o asfalto quente.

Outras alternativas em estudo

O asfalto possui diversos impactos ambientais, sendo um produto à base de petróleo, que durante todas as etapas de preparação gasta bastante energia e emite gases nocivos ao meio ambiente, além de ser utilizada uma fonte não renovável.

O asfalto é composto por componentes aromáticos e saturados, resinas e asfaltenos, que fazem parte de uma das classes de compostos químicos mais poluentes, com potencial nocivo à saúde humana. Ainda, alguns tipos utilizam o querosene como solvente, produto que

quando derramado sobre o solo, pode ocorrer lixiviação e contaminação de lençóis freáticos, causando ainda a infertilidade do solo. Parte do querosene evapora, resultando em emissões de gases nocivos ao meio ambiente e à saúde das pessoas. Mesmo depois de aplicado o asfalto continua causando impactos, gerando poluição da água e do ar, incluindo poluentes perigosos.

Pesquisadores da *Swinburne University* na Austrália, realizaram estudo usando a borra de café como parte de um material de construção de estradas mais sustentáveis, além de outros materiais reciclados, como tijolos quebrados, vidro e concreto. Os pesquisadores identificaram benefícios da utilização do produto, sendo capaz de gerar blocos cilíndricos robustos o suficiente para serem utilizados abaixo da superfície da estrada.

Ainda na Austrália, pesquisadores da Universidade RMIT utilizaram bitucas de cigarro, pneus descartados, entulho de construção e máscaras cirúrgicas para criarem materiais rodoviários de alto desempenho. O uso do material, em uma estrada de duas pistas de um quilômetro poderiam evitar que 93 toneladas de lixo fossem para os aterros sanitários.

Na Suíça, uma equipe de pesquisadores investigou o uso de cordas cuidadosamente colocadas por braços robóticos para unir asfalto no lugar de betume. O cascalho foi entrelaçado com um fio que mantinha toda a estrutura no lugar, substituindo o concreto para unir as pedras soltas.

Na França, há um experimento da captação da luz solar, sendo utilizados painéis solares integrados. As rodovias ficam expostas à luz solar durante todo o dia, sendo uma forma de produção de energia. Os blocos são formados por placas fotovoltaicas resistentes, colados sobre o pavimento já existente das rodovias e possuem um revestimento resistente ao tráfego pesado e à água da chuva. As rodovias vão captar a energia do sol e convertê-la em eletricidade, que poderá ser usada na iluminação pública, em prédios e lojas.

Materiais e Métodos

Análise comparativa entre as metodologias

Com o intuito de auxiliar na avaliação das metodologias apresentadas neste artigo, foi elaborado a **Tabela I**, onde é apresentada cada metodologia buscando avaliá-las em pontos consonantes com o tema do trabalho, avaliando-as em comparação com a metodologia convencional de pavimentação. Sendo o foco do tema do trabalho a sustentabilidade, as metodologias foram avaliadas quanto a sua influência no custo geral, seja de fabricação/aplicação ou de matérias-primas. Para uma avaliação de redução de impactos de acordo com as políticas nacionais de preservação do meio ambiente, foram avaliadas possibilidades metodologias para contribuir com o gerenciamento de resíduos com base no princípio dos “3 R’s”, redução, reutilização e reciclagem e a influência da metodologia na resistência do pavimento, fator crucial para a definição da utilização do mesmo, sendo que o DNIT define padrões de resistência e outras características físicas que qualquer mistura utilizada na pavimentação deve conter.

Tabela I – Comparação de parâmetros de sustentabilidade das técnicas abordadas na revisão bibliográfica com os métodos de pavimentação convencionais

METODOLOGIA	CUSTO	REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS	RESISTÊNCIA
Asfalto com adição de plástico	Redução, pela utilização de resíduos de fácil acesso	Resíduos de plásticos (Garrafas, sacolas etc.)	Aumento da resistência final
Bioasfalto	Não encontrado	Reciclagem de resíduos orgânicos/vegetais	Redução na resistência, aumento da plasticidade
Cimento asfáltico do petróleo – alta penetração	Redução de custos de produção	Contribui para misturas utilizando resíduos de asfalto	Sem dados
Asfalto espumado	Redução dos custos de produção e transporte	Não há reutilização	Aumento da resistência sem demanda de aditivos
Asfalto com adição de borracha	Redução, pelo aproveitamento de resíduos	Reutilização de resíduos de borracha	Aumento da resistência e impermeabilidade
Pavimentação fotocatalítica	Aumento no custo, pelo uso do fotocatalisador	Uso de partículas de vidro contribui com o catalisador	Perda de resistência com adição de partículas de vidro
Asfalto permeável	Aumento no custo, devido à especificidade para execução	Não há reutilização	Perda de resistência, devido a porosidade
Pavimento asfáltico recuperado	Redução pelo aproveitamento de resíduos	Resíduos de asfalto enrijecidos	Aumento da Resistência com aplicação de cimento
Resíduos de obra	Redução pelo aproveitamento de resíduos	Resíduos de construção e demolição (areias, madeira, borrachas)	Melhora na resistência
Geocélula	Não encontrado	Reciclagem de resíduos plásticos (geotêxtis)	Melhora na resistência do solo
Asfalto a frio	Redução, aplicação mais simples	Não há reutilização de resíduos	Resistência inferior sendo adequado para pavimentos leves

Fonte: Elaborada pelo próprio autor;

Com base na tabela e nos dados encontrados na revisão bibliográfica, será feito uma análise crítica das técnicas abordadas, buscando definir as práticas que se apresentam promissoras no atual estado da arte, e seus principais atributos e pontos relevantes.

Resultado e discussão

A partir da análise das técnicas é possível verificar que algumas delas possuem um potencial satisfatório para resistência, e contemplam uma abordagem sustentável com boa capacidade para implementação no futuro, assim será feito um breve resumo de cada técnica e suas especificidades.

O asfalto com adição de resíduos de plástico possui uma excelente abordagem com foco na sustentabilidade, principalmente quanto fica proposto a utilização de resíduos de

plástico que não possuem um potencial expressivo para reciclagem, pois a qualidade deste material acaba ficando comprometida quando reciclado várias vezes. Essa técnica apresentou-se como uma boa abordagem, pois além de utilizar resíduos comumente gerados, proporciona resultados positivos de resistência.

O bioasfalto embora aborde uma prática interessante, podendo usar resíduos problemáticos como óleos de cozinha, gorduras, sebos e frações de fundo de processos termoquímicos, ele não apresentou resultados interessantes no atual estado da arte, sendo que o único resultado positivo foi sua influência na resistência do CAP em baixas temperaturas.

O cimento asfáltico de petróleo de alta penetração, embora não se encontre muita informação para discussão, apresenta um potencial de uso promissor e sustentável, pois tal cimento contribui para o melhor aproveitamento de resíduos de pavimentação, que atualmente não possuem uma utilização com desempenho elevado, ficando reservado ao uso como base. Já com o CAP para o AP podem ter seu uso potencializado, inclusive em reaproveitamento. Além deste ponto, essa composição tem um impacto interessante no consumo energético da produção da mistura levando em consideração que ele reduz o ponto de amolecimento da mistura em quase 10° C.

O asfalto espumado é prática de baixa de difusão, embora que seu desenvolvimento não é considerado recente, todavia tal prática possui excelentes características quanto a resistência, sem necessidade de aplicação de aditivos. Além do seu aspecto de resistência, os autores mencionam ainda a melhora na eficiência produtiva, relacionada a uma redução de custo operacional de deslocamento e trabalhabilidade na aplicação. Entretanto esta técnica não aborda em nenhum dos trabalhos a possibilidade de reutilização de resíduos.

A adição da borracha no asfalto é uma prática já de ampla utilização no mercado de pavimentação, pois demonstra-se uma boa prática que aumenta a resistência plástica do asfalto, aproveitando um problemático resíduo que não pode ser reciclado, e não possui degradação rápida. Além do mencionado, a aplicação destes resíduos melhora a aderência do asfalto.

A pavimentação fotocatalítica é uma técnica que consiste na fabricação de bloquetes pré-moldados de concreto, e se demonstra promissora em utilização urbana, não sendo adequada para uso em rodovias. Contudo seu potencial de captura de emissões atmosféricas é um ponto de importante relevância, com o potencial de melhora da qualidade do ar em grandes centros urbanos, ainda com a possibilidade que vem sendo avaliado da utilização de resíduos de vidro que potencializam a eficiência da foto catalisadora, o que aumenta seu potencial como técnica sustentável, dando destino a um resíduo que embora seja reciclável nem sempre tem viabilidade econômica para tal.

O asfalto permeável tem ganhado espaço na literatura técnica como uma alternativa para estradas com melhor aderência (redução de aquaplanagem), e como uma alternativa para a redução do escoamento superficial, entretanto a prática teve um potencial satisfatório pois possui uma aplicação que, embora seja semelhante ao asfalto convencional, apresenta mais etapas de trabalho. Além disso, o asfalto deste tipo quando comparado com a pavimentação convencional demonstra-se restrita pois possui resistência inferior devido a porosidade do material. Sua eficiência como material infiltrante embora seja superior ao asfalto convencional, não tem uma relevante influência no escoamento superficial, sendo ainda necessário sistemas pluviais.

Pavimento asfáltico recuperado já é uma técnica difundida no mercado, utilizado tanto

para fins econômicos, como de redução de resíduos. Os trabalhos estudados sobre tal técnica demonstraram que a resistência deste asfalto permite uso dele como base para pavimentação, desde que aplicado junto com uma proporção de cimento, sem muita variação quando comparado com proporções entre 1% a 5%. Seu uso sem cimento atende requisitos de resistência inferiores, sendo este satisfatório apenas para utilização na sub-base.

A utilização de resíduos de construção civil (RCC) e resíduos de construção e demolição (RCD), demonstraram uma prática promissora, visando que estes são resíduos problemáticos e de difícil destinação final. Contudo, por apresentarem materiais que muitas vezes oferecem elevados valores de resistência, mantiveram seus resultados na aplicação na mistura com CAP. Ainda foi demonstrado que sua aplicação tem potencial de contribuir com a utilização de outros resíduos. Do ponto de vista financeiro, a utilização de resíduos pode gerar uma economia, visando que prove destino a resíduos sem grande espaço para destinação e, como os autores mencionam, torna-se uma alternativa para viabilização de pavimentação de áreas onde a disponibilidade de recursos de pavimentação não é tão grande, reduzindo custos logísticos utilizando materiais residuais de construção nas proximidades.

A Geocélula é uma solução alternativa para aplicação em solos com baixa resistência, podendo ser utilizada para incrementar a resistência em aplicação de obras de pavimentação, e ser usada para a melhora de solos das estradas vicinais onde muitas vezes o próprio solo serve de pavimento. Essa prática também possui um escopo de reciclagem de materiais, como no caso das fibras de polipropileno utilizadas na fabricação da Geocélula. Por ser uma etapa adicional, financeiramente falando há um aumento no custo, porém este custo pode ser mitigado a longo prazo, pois estradas melhores assentadas demandam menos manutenção ao decorrer de seu uso.

O asfalto a frio é uma técnica que vem ganhando desenvolvimento junto com o desenvolvimento de emulsões de alta tecnologia, porém no atual estado da arte ela perde em muitos fatores para a produção a quente, pois possui limitações ambientais para aplicação e não atingem elevadas resistências a curto prazo (sendo necessário que toda a água da mistura seja evaporada para tal). Na questão ambiental a prática define redução do consumo energético e aplicação mais fácil, por não necessitar de aquecimento o que também confere uma menor redução de emissões atmosféricas de gases do efeito estufa e de fumos nocivos do asfalto.

Conclusão

As estradas e rodovias são essenciais à sociedade moderna, no entanto trazem impactos positivos e negativos, por isso a sua edificação ou construção deve ser voltada a uma visão sustentável, ou seja, construída sem comprometer o futuro daqueles que virão. O desenvolvimento sustentável deve estar atrelado a proteção ambiental e a construção de uma visão voltado ao meio ambiente e as formas de protegê-lo. Devem ser buscadas ferramentas, materiais e técnicas que sejam capazes de auxiliar nas estratégias de cuidado e proteção.

O uso de novas técnicas na construção de estradas e rodovias é um passo significativo em direção a práticas mais sustentáveis e eficientes. Muitas das técnicas fazem uso de produtos reciclados, como plástico, asfalto antigo, pneus, dentre outros, promovendo a diminuição de resíduos que são depositados no meio ambiente. Nota-se que se trata de medidas que promovem benefícios ao meio ambiente além de promover melhorias em termos de custos.

Em uma análise crítica, podemos mencionar como técnicas que se demonstram

promissoras no estado atual, e que podem ganhar campo em um futuro próximo a mistura de asfalto com utilização de resíduos plásticos reutilizados, tendo em vista que esta adição resultou em melhor resistência, utilização de resíduos plásticos de baixo potencial de reciclagem e elevado potencial contaminante, sendo que o próprio plástico em si demonstra-se ser um grande problema por sua lenta degradação ambiental, e ocupar grandes volumes por sua baixa densidade. Por ser uma adição que agrega resistência a mistura final sem perder o aspecto ambiental. Esta adição ainda confere melhor impermeabilidade para a pavimentação, o que conseqüentemente acarreta menor demanda de manutenção do pavimento, sendo que a infiltração de água nas fissuras do asfalto possui o potencial a degradação do pavimento.

Outra técnica que merece destaque, no âmbito de utilização em centros urbano é a pavimentação fotocatalítica, onde a técnica demonstra uma abordagem sustentável, reduzindo emissões atmosféricas de óxidos nitrosos, componente nocivo à saúde humana e ao meio ambiente, além de ter sido demonstrado que a utilização de partículas de vidro tem um potencial positivo na melhoria da eficiência do catalisador, esta abordagem abre espaço para utilização de resíduos de vidro, que muito embora sejam recicláveis, possuem um processo complexo de transformação.

Em razão da importância das rodovias para o crescimento socioeconômico da sociedade, e do constante crescimento da malha rodoviária, é fundamental que sejam buscados meios de prevenir os danos ambientais ou no mínimo minimizá-los. Dentre essas, foram citados nos estudos algumas dessas técnicas, muitas delas ainda em fase de estudo, mas que já estão apresentando bons resultados, tais como o uso do asfalto plástico que reduz o descarte de toneladas de plástico em aterros passando a ganhar uma nova utilidade, plástico borracha com o uso de pneus inutilizados e o asfalto utilizando resíduos de obra na argamassa do concreto.

Referências Bibliográficas

AGUIAR, Alexandre; PHILIPPI Jr., Arlindo. Reciclagem de plásticos de resíduos domésticos: problemas e soluções. *Congreso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental. Asociación Interamericana de Ingenieria Saniratia y Ambiental*. Lima, 1998. 15p. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/267849621_RECICLAGEM_DE_PLASTICOS_DE_RESIDUOS_DOMESTICOS_PROBLEMAS_E_SOLUCOES. Acesso em: 05 set. 2024.

ALMEIDA, Victor Garcia de; ALMEIDA, Mario Sergio de Souza; MACIEL, Fernanda Costa da Silva; MOURA, Luciana Negrão de; COSTA, Weiner Gustavo Silva; SÃO MATEUS; COSTA, Maria do Socorro. Diferentes Metodologias de Dosagem de Misturas Solo-RAP para Uso em Pavimentação. *Anuário do Instituto de Geociências*, 2021, Vol. 44, p1. DOI: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_36210. Acesso em: 30 ago. 2024.

BARBOSA, Abimael Sotero. **Identificação e Avaliação dos Impactos Ambientais Passivos da Construção/Pavimentação de Rodovias, Apresentando suas Medidas Mitigadoras**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 3, Ed. 3, Vol. 4, pp. 39-53, mar. 2018. ISSN: 2448-0959.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008. 750 p.

BITENCOURT, Amanda. **Panorama da descarbonização na produção de misturas asfálticas a quente**. 2023. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/29928>. Acesso em: 12 ago. 2024

BRITO, Mateus Silva; BARROSO, Suelly; GONDIM, Lilian Medeiros. **Análise do bio-óleo da pirólise de fibras de coco na obtenção de um bioligante para pavimentação**. In: Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2023, Santos. Anais eletrônicos... Campinas, 2023. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet/anpet-2023/trabalhos/analise-do-bio-oleo-da-pirolise-de-fibras-de-coco-na-obtencao-de-um-bioligante-p?lang=pt-br>. Acesso em: 24 ago. 2024.

BROCHADO, Matheus Matos Lepsqueur. **Estudo da viabilidade do asfalto pré-misturado a frio em rodovias de médio e baixo tráfego**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil. Centro Universitário de Brasília. Brasília, 2014. p. 59. Disponível em: <https://repositorio.uniceub.br/jspui/handle/235/6383>. Acesso em: 15 ago. 2024.

COELHO, Johnny Gilberto Moraes; SOUSA, João Guilherme Mota de; DIAS, Carmen Gilda Barroso Tavares. **Estrada ecoeficiente: aplicação de asfalto com adição de composto madeira/borracha na região Norte do Brasil**. Novos Cadernos NAEA, v. 24, n. 3, p. 121-142. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.18542/ncn.v24i3.8851>. Acesso em: 08 ago. 2024.

DELIBERALLI, Flavius. **Asfalto produzido com embalagens plásticas recicladas tem durabilidade três vezes maior do que o convencional**. 2023. Disponível em: <https://conectaverde.com.br/asfalto-produzido-com-embalagens-plasticas-recicladas-tem-durabilidade-tres-vezes-maior-do-que-o-convencional/>. Acesso em 23 mar. 2024

GABRIEL Andrade Luiz; SILVA, Thalles Gumieri da; ASSIS, Rita de Cássia Texeira; ROCHA, Lucas Machado; PERES, Silane Mattos. **Estudo da viabilidade técnica do uso do asfalto permeável como alternativa de prevenção de enchentes urbanas na cidade de três rios**. Epitaya E-books, [S. 1], v. 1, n. 12, p. 82-98, 2020. DOI: 10.47879/ed.ep.2020144p82. Disponível em: <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/52>. Acesso em: 24 out. 2024.

GONZALES REMOND, Mario Hebert. *Propuesta para la Mejora de los Pavimentos Asfálticos Utilizando el Metodo del Asfalto Espumado*. Orientador: Eng. Olger Febres Rosado. 2017. 143 f. Tese (Engenheiro Civil), Universidad Católica de Santa María, Arequipa, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/6769>. Acesso em: 14 ago. 2024.

GOTTEMS, Leonardo. **Holanda inicia primeira estrada com bioasfalto**. Agrolink, 2021. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/noticias/holanda-inicia-primeira-estrada-com-bioasfalto_451367.html. Acesso em 23 ago. 2024.

LINS, Eduardo Antonio Maia; Silva, Tayanne Maria Rufino da Silva; MOTA, Adriane Mendes Vieira; BARROS, Andéa Cristina Baltar; CALSA, Maria Clara Pestana. Análise dos impactos ambientais em uma rodovia – estudo de caso da PE – 063. In: 2º. ConReSol – Congresso Sul-americano de Resíduos e Sustentabilidade, Foz do Iguaçu-PR, **Anais - Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**, Bauru: IBEA, 2019, v. 2, 6 p. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/conresol/2conresol.htm>. Acesso em: 06 ago. 2024.

MALTA, Juliana Oliveira; SILVA, Vanessa Silveira; GONÇALVES, Jardel Pereira. ARGAMASSA CONTENDO AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO. *Revista Eletrônica De Gestão E Tecnologias Ambientais*, 2013, 1(2), 176–188. <https://doi.org/10.9771/gesta.v1i2.7214>. Acesso em: 20 ago. 2024.

MELO, João Victor Staub de. **Desenvolvimento de peças pré-moldadas de concreto fotocatalíticas para pavimentação e purificação do ar**. Orientador: Glicério Trichês. Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011. 208 p. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/95970>. Acesso em: 18 ago. 2024.

OLIVEIRA, Millena Damilde de. **Utilização de Resíduos em Pavimentação Rodoviária**. 2014. 116f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/127342> . Acesso em: 18 ago. 2024.

PIRES, Rodrigo Azevedo Gonçalves; CALADO, Jane da Cunha; FURTADO, Dayana Brainer da Silva; NETO, Wilson Levy Braga da Silva. Viabilidade técnica do asfalto permeável, como alternativa na mitigação de inundações, em áreas urbanas. **Anais do VII SINGEP**, v. 7, São Paulo, 2018. Disponível em: https://singep.submissao.com.br/7singep/resultado/an_resumo.asp?cod_trabalho=66. Acesso em: 15 ago. 2024.

RAMOS, Victória Nunes. **O uso de polietileno de alta densidade como modificador do cimento asfáltico de petróleo**. 2022. 99 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenheiro Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/24713> . Acesso em: 15 ago. 2024.

REZENDE, Elcio Nacur; COELHO Hebert Alves. **Impactos ambientais decorrentes da construção de estradas e suas consequências na responsabilidade civil**. RVMD, Brasília, V. 9, nº 2, p. 155-180, Jul-Dez, 2015. DOI: <https://doi.org/10.31501/rvmd.v9i2%20Jul/Dez.5880>. Acesso em: 28 ago. 2024.

RIBAS, Marcos Caetano. **A história do Caminho do Ouro em Paraty**. 2. ed. Paraty: Contest Produções Culturais, 2003.

RIBEIRO, Jefferson Pereira; BARBOSA, Lucas Melo; CASTELO BRANCO, Verônica Teixeira Franco; CAVALCANTE, Rivelino Martins. **Avaliação da emissão de poluentes atmosféricos durante os processos de usinagem, transporte e aplicação de misturas asfálticas em ambiente urbano**. In: 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. 32, 2018, Gramado – RS. **Anais 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da Gramado**: ANPET, 12 p. 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/56106>. Acesso em: 09 ago. 2024.

ROQUE, Priscila Fiochi Bento. **Uso de materiais alternativos para melhoria de solos em pavimentação**. Orientador: José Camapum de Carvalho. 2017. 124 f., Tese (Doutorado em Geotecnia) —Universidade de Brasília, Brasília, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.26512/2017.04.T.24085>. Acesso em: 25 ago. 2024.

ROSA, Mayra. **Asfalto que absorve a poluição do ar é criado na Holanda**. 2013. Ciclo Vivo. Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/planeta/desenvolvimento/asfalto-que-absorve-poluicao-do-ar-e-criado-na-holanda/>. Acesso em 23 ago. 2024

ROSSO, Lucas Torres de. **Desenvolvimento de argamassa translúcida fotocatalítica para pavimentação urbana**. Orientador: Prof. Dr. João Victor Staub de Melo. Dissertação (mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Orientador: João Victor Staub de Melo, 286 p. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/215689>. Acesso em: 02 set. 2024.

TEIXEIRA, José Henrique. Resíduos de construção e demolição – concreto reciclável. **Revista Científica Semana Acadêmica**. Fortaleza, ano MMXVIII, Nº. 000144, 20 nov. 2018. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/artigo/residuos-de-construcao-e-demolicao-concreto-reciclavel>. Acessado em: 07 set. 2024.

THENOUX, Gillermo & JAMET, Andrés. **Foamed asphalt technology**. *Revista Ingeniería De Construcción*, v. 17, n. 2, p. 84–92. Santiago, 2002. Disponível em: <<https://revistaingenieriaconstruccion.uc.cl/index.php/ric/article/view/17139>>. Acesso em:

TRIMBAKWALAM, Ahmed. **Plastic Roads: Use of Waste Plastic in Road Construction**. *International Journal of Scientific and Research Publications*. Nova Delhi, India, v. 7, n. 4, p. 137-139. Abril, 2017. Disponível em: < <https://www.ijsrp.org/>> Acessado em 23 agosto de 2.024.

VALENÇA, Patrícia de Magalhães Aragão; FROTA, Consuelo Alves da; BERTOLDO, Rayglon Alencar; CUNHA, Tayana Mara Freitas da. Estudo de Misturas Areia-Asfalto com Areia de Resíduo de Construção e Demolição, Fibra do Açaí d Polímeros para s Cidade De Manaus, AM. **Ciência & Engenharia**, v. 20, n. 2, p. 11-19. 2011. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/13675>. Acesso em: 06 set. 2024.

VEIGA, Renato Gabriel Alencar da Veiga. **Resíduos sólidos e o novo marco de saneamento básico: a problemática das embalagens de vidro no Distrito federal sob a luz do “buen vivir”**. Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica apresentado à Assessoria de Pós-Graduação e Pesquisa. Orientador: Dr.^a Mariana Barbosa Cirne. Centro Universitário de Brasília. Brasília, 2023. DOI: DOI: <https://doi.org/10.5102/pic.n0.2022.9497>. Acesso em: 04 set. 2024.

WEN, Haifang; BHUSAL, Sushanta; WEN; Bem; *Laboratory Evaluation of Waste Cooking Oil-Based Bioasphalt as an Alternative Binder for Hot Mix Asphalt*. Journal of Materials in Civil Engineering. Reston, VA, v. 25, n. 10, p. 1432-1437. Out. 2013. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000713>. Acesso em: 24 ago. 2024.

CopySpider

Ferramentas Ajuda

Arquivo URL Iniciar Parar **Limpar** Opções Relatórios Scholar

E-mail caio.deantoni1@gmail.com Modo de pesquisa Arquivos da internet

	Nome do arquivo de entrada	Tempo	Progresso	Chance	Status	Relatório	
1	C:\Users\Caio\Downloads\Praticas In...ctos ambientais - Caio e Diego.pdf	10:42	100.0%	0,56%	Ok		

APOIA.se

torne-se um Apoiador e tenha acesso a licenças exclusivas com todos os recursos do **CopySpider**.

Versão: 2.3.1