



CENTRO UNIVERSITÁRIO PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS
UNIPAC BARBACENA
ENGENHARIA CIVIL

IGOR ALBERTO VIOLETI DE SOUZA
RODRIGO DE OLIVEIRA SILVA

TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS APLICADAS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

BARBACENA/MG

2022

IGOR ALBERTO VIOLETI DE SOUZA
RODRIGO DE OLIVEIRA SILVA

TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS APLICADAS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Presidente Antônio Carlos – FUPAC como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Emanuel Bomtempo Matos

BARBACENA/MG

2022

SOUZA, Igor Alberto Violeti de; SILVA, Rodrigo de Oliveira. **Tecnologias sustentáveis aplicadas em pavimentos asfálticos**. Barbacena: 2022. 20p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Centro Universitário Presidente Antônio Carlos.

Resumo: Com diversas novas tecnologias surgindo, a pavimentação vem se atualizando com o propósito de amplificar sua durabilidade, sustentabilidade e custo. Pavimentações do tipo ecológica vêm sendo estudadas de forma constante para que novas tecnologias sejam implementadas a fim de reduzir custos e aumentar a durabilidade, sem prejudicar o meio ambiente. Diversas formas de realizar esse trabalho vêm surgindo, com implementação de incrementos no pavimento, com a intenção de reutilizar materiais recicláveis, aumentando consideravelmente a resistência deste, mantendo o alinhamento de preservação do meio ambiente e consequentemente reduzindo o custo do mesmo por metro quadrado. Dessa forma, objetiva-se a partir do presente artigo apresentar o aumento na qualidade e durabilidade do pavimento, além de exibir os materiais utilizados que gerariam danos para meio ambiente e as principais características de um pavimento dito sustentável. Por fim, conclui-se que a utilização desses materiais pode representar a solução de inúmeras problemáticas existentes em solo nacional. O trabalho ainda reforça a importância da constante atualização do setor e da realização de trabalhos que constatem composições alternativas das massas asfálticas, a fim de ampliar a aplicação de pavimentos sustentáveis.

Palavras-chave: Pavimento. Asfalto ecológico. Meio Ambiente. Reciclável.

Abstract: With several new technologies emerging, paving has been updated in a way that contributes to durability, sustainability and cost. Ecological type paving has been constantly studied so that new technologies are implemented in order to reduce costs, increase durability without harming the environment. Several ways of carrying out this work have emerged with the implementation of increments in the pavement in order to reuse recyclable materials, considerably increasing the resistance of the pavement, and maintaining the alignment of preservation of the environment and consequently reducing the cost per square meter of the same. Thus, the objective of this article is to present the increase in the quality and durability of the pavement, in addition to showing the materials used that would cause damage to the environment and the main characteristics of a so-called sustainable pavement. Finally, it is concluded that the use of these materials can represent the solution of numerous existing problems in national soil. The work also reinforces the importance of constantly updating the sector and carrying out works that verify alternative combinations of asphalt mixes, in order to expand the application of residential pavements.

Keywords: Floor. Ecological asphalt. Environment. Recyclable.

1 INTRODUÇÃO

A resistência da pavimentação de rodovias e estradas vicinais é um fator que vem sendo testado periodicamente devido à grande variabilidade e crescimento da frota veicular brasileira. O desgaste das rodovias e problemas ambientais produzidos pelo processo de pavimentação de rodovias geraram novos desafios (SIMONETTI, 2010).

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte – CNT (2021), o Brasil é um país que apresenta preferência pelo transporte rodoviário, ainda que apenas 12,3%, aproximadamente, das vias rurais sejam asfaltadas. Com essa defasagem no setor, diversas tecnologias vêm sendo empregadas a fim de reduzir custos e aumentar a durabilidade do pavimento.

Analisando os processos evolutivos tecnológicos na engenharia civil como um todo, percebe-se o atraso na aplicação de novas tecnologias na pavimentação. Porém, nas últimas décadas, observa-se uma leve mudança nesse quesito. Na busca por viabilidade técnica e sustentável alinhadas ao crescimento da frota mundial, pesquisadores estão buscando novas tecnologias em pavimentação (SPECHT, 2004).

Visando uma forma de amenizar os danos causados ao meio ambiente, surge uma nova tecnologia, conhecida como asfalto ecológico. O pavimento traz a proposta de alinhar a durabilidade e qualidade da pavimentação junto à preservação do meio ambiente. O mesmo recebe aditivos recicláveis e/ou renováveis com o intuito de aumentar sua durabilidade, tendo como exemplo borrachas (como pneus), rejeitos e escórias, além de óleos vegetais para pavimentação de estradas vicinais (ARAÚJO, 2015).

A utilização desse tipo de pavimento traz benefícios não só para a qualidade das rodovias como também para o meio ambiente. Por ser produzido por meio de materiais que quase sempre são descartados, gerando prejuízos ambientais, o pavimento também “herda” qualidades dos aditivos adicionados (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER, 1998a).

Pelas qualidades e benefícios que a pavimentação ecológica traz, tendo em vista não somente questões estruturais do pavimento, mas também a questão de promover a sustentabilidade, este artigo tem o objetivo de expor, por meio de uma revisão de literatura, as características principais de um pavimento dito sustentável,

apresentar suas qualidades e os principais e usuais elementos componentes de um pavimento dessa natureza, além de apresentar os custos, eficiência e durabilidade do pavimento sustentável.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 História

Há algum tempo já se mistura material betuminoso e polímeros, visando melhorar a qualidade da pavimentação. Para se ter ideia, em 1823 T. Hancock patenteou uma combinação de borracha natural com asfalto para ser usada como impermeabilizante. Já a primeira patente dessa mistura para pavimentação foi obtida em 1844 por E.E. Castell. Porém, mesmo com a adição de borracha ao material betuminoso, o mesmo não era considerado um pavimento ecológico, somente em 1960, quando começa a se adicionar pneus descartáveis ao ligante asfáltico, o mesmo adquiriu características ecológicas (ZANZOTTO; KENNEPOHL, 1996).

Ao longo dos anos, houve um aumento de novas técnicas, estudos e inserção de novos materiais ao ligante betuminoso, tornando mais vasto o universo da pavimentação ecológica. Diversos materiais que seriam descartados na natureza começaram, então, a ser introduzidos na pavimentação de rodovias, tanto na pavimentação da via quanto no leito, subleito etc. (SPECHT, 2004).

Estudos mostram como a inserção desses materiais reduzem o custo da implantação do pavimento nas rodovias, além de melhorar significativamente a qualidade e durabilidade da pavimentação (SPECHT, 2004).

2.2 Tipos de pavimentos sustentáveis

O pavimento sustentável é uma técnica que visa diminuir os impactos ambientais gerados por resíduos descartáveis de diversos materiais. Ao misturar esse tipo de material ao ligante asfáltico, o mesmo adquire características ecológicas, já que o material seria descartado gerando danos ao meio ambiente (ODA; FERNANDES JÚNIOR, 2001)

Ou seja, o pavimento sustentável nada mais é que a adição de um material que seria descartado ao ligante asfáltico com a função de melhorar a durabilidade,

qualidade e desempenho do pavimento, além de, é claro, auxiliar na preservação e sustentabilidade. (BERNUCCI *et al.*, 2006). Exemplo destes materiais são: a borracha, escória de aciaria, rejeito de mineração, resíduos da construção civil, dentre outros.

1. Pavimento de borracha

O asfalto ecológico a partir de borracha de pneu começou a ser desenvolvido na década de 1960 por um oficial da Força Aérea dos Estados Unidos, Charles Henry MacDonald. (ARAÚJO, 2015). A primeira aplicação da borracha com ligante asfáltico foi realizada na cidade Phoenix, EUA, e após 6 anos o pavimento não apresentava nenhuma formação de trincas por reflexão¹. Devido a isso, MacDonald continuou seu trabalho experimental com a empresa Atlos Rubber Inc. (ODA; FERNANDES JÚNIOR, 2001).

Mas somente a partir dos anos 80, a adição de borracha de pneu em mistura asfáltica se tornou atrativa, devido a seu papel ecológico para diminuir os problemas ambientais que o descarte de pneus causa (ODA; FERNANDES JÚNIOR, 2001).

No Brasil, apenas na década de 1990, algumas universidades e o CENPES (Centro de pesquisas da Petrobrás) começaram a desenvolver pesquisas relacionadas ao assunto. Os resultados foram publicados em teses de doutorado (LEITE, 1999).

Além da vantagem ecológica, o pavimento com adição de borracha traz diversos benefícios para a via, sendo que alguns merecem destaque, dentre eles:

- Aumento da aderência: há um aumento da mesma devido à utilização da borracha conferindo mais aderência com os pneus, além de o mesmo ter um melhor desempenho em dias de chuva, diminuindo a camada superficial de água e apresentando melhor absorção (SANTOS, 2008).

- Aumento na durabilidade do pavimento, já que fissuras em pavimentos construídos com adição de borracha chegam a ser até 4 vezes menor em quantidade, se comparado a um pavimento convencional (FAXINA, 2002) (FIG 1).

¹ Trincas que aparecem em camadas superiores do pavimento pela propagação das trincas formadas nas camadas inferiores (BERNUCCI, 2006).

- Maior resistência à temperatura quando exposto tanto a baixas quanto altas temperaturas, o asfalto com borracha tem uma resistência maior se comparado com o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) (HEIZTMAN, 1992; RUTH *et al.*, 1997).

- Redução na deformação permanente da via nos trilhos de roda², trincas por fadiga e contração (TAKALLOU; SAINTON, 1992) (FIG. 2).

Na figura 1, é possível observar que, após ciclos de teste em pavimento a base de borracha (esquerdo) e CBUQ tradicional (direito), pôde-se verificar que o pavimento de CBUQ sofreu maior dano por deformação permanente e apresentou maior quantidade de trincas, enquanto o pavimento com borracha demonstrou apenas uma fissura e deformações permanentes mínimas. (GONÇALVES, 2002).

Figura 1 - Dois pavimentos no simulador de tráfego da UFRGS, após testes.



Fonte: Gonçalves (2002)

Figura 2 - Deformações permanentes em asfalto com borracha e asfalto convencional (CBUQ).



² Deformações causadas no pavimento por esforços repetitivos das rodas dos veículos (DNIT, 2006).

Fonte: Neves (2004)

Apesar de ser feito com adição de um material descartável, o asfalto de borracha no Brasil ainda custa caro, visto que, de acordo com levantamentos feitos, o pavimento que leva de 15% a 20% de borracha oriunda de pneus descartados é cerca de 8,77% mais cara que o pavimento tradicional. O referido aumento de custo é ocasionado pela necessidade de equipamentos específicos para o processamento da borracha, granulometria intrínseca aos agregados pétreos, inexistência de normas que padronizem a dosagem e o custo da borracha picada. (LEITTE, 2021; BERTOLLO; FERNANDES, 2002).

0.0.1. Pavimento com escória de aciaria

O refino do aço gera como resíduo as escórias de aciaria, há uma grande quantidade desses resíduos industriais sendo gerada anualmente, logo, o aproveitamento desses é de suma importância para a preservação do meio ambiente. Dentro do contexto de pavimentação ecológica, o uso de escória de aciaria se mostra como mais uma alternativa para o desenvolvimento de pavimentação ecológica, reduzindo assim o impacto ambiental causado pela exploração de materiais das jazidas (SOUZA, 2007).

A escória de aciaria vem sendo utilizada na infraestrutura de pavimentação do Brasil desde 1986, com a execução de um trecho de 100km de base e sub-base no estado do Espírito Santo (SILVA, 1994).

Com a crescente atividade na produção de aço chegando a, aproximadamente, 1,95 bilhão de toneladas no mundo em 2021 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022), estudos vêm sendo feitos para a reutilização da escória de aciaria. Para se ter ideia da quantidade de resíduos gerada na exploração das jazidas, para cada uma tonelada de aço produzido, é gerado 140 kg de escória, ou seja, 14% de tudo que é produzido se torna escória (FREITAS; MOTTA, 2008).

Com tanto resíduo sendo gerado, o uso de escória de aciaria na pavimentação se torna uma grande vantagem ambiental, além de trazer vários benefícios para o pavimento (SOUZA, 2007).

Do ponto de vista técnico, vários estudos podem ser encontrados tanto em trabalhos mais antigos, como por exemplo Wachsmuth et al. (1981), Emery (1984), Geiseler (1996) e Kandhal e Hoffman (1997), quanto em pesquisas mais recentes,

entre as quais podemos citar Castelo Branco (2004), Wu et al. (2007), Freitas e Motta (2008), Ahmedzade e Sengoz (2009), Wang et al. (2010), Pedrosa (2010), Passetto e Baldo (2012), Sorlini, Sanzeni e Rondi (2012), Chen e Wei (2016) e Groeninger e Wistuba (2017). Esses estudos mostram que o resíduo tem propriedade mecânica equivalente ou superior ao de materiais utilizados atualmente, pavimentos de base e sub-bases que são compostos por escória de aciaria apresentam maior capacidade de distribuição de carga se comparados a estruturas de pavimentos convencionais (LIMA, 2000). (FIG. 3).

Figura 3 – Utilização de escória de aciaria na sub-base do pavimento



Fonte: Diário Popular (2016)

Tendo um baixo custo de implementação, demonstrado pela composição de uma pavimentação até 60% mais barata se comparada à de CBUQ, a utilização desse material se torna economicamente atrativa, principalmente em localidades próximas a indústrias de aço que geram escórias. Além de ser um grande atrativo para as unidades produtoras, já que o acúmulo desse material nos pátios da siderúrgica gera custos de disposição para a mesma (ALVARENGA, 2001; TERRA JÚNIOR, 2017).

Além do uso na base e sub-base, há alguns estudos da aplicação da escória de aciaria no pavimento, como os apresentados por Castelo Branco (2004) e Nóbrega (2007). Estes estudos apresentam cuidados a serem tomados para aplicação na pavimentação. Segundo Bona et al. (2020), apesar de boas qualidades técnicas, a escória de aciaria na pavimentação não tem um grande emprego, já que apresenta granulometrias variadas. Tal fato é elucidado por Costa, Choque Fernandez e Sousa (2019), que estudaram resíduos siderúrgicos – escórias

de aciaria e de alto-forno – produzidos em usinas localizadas no percurso da Estrada de Ferro Carajás. Um dos componentes do trabalho foi a avaliação granulométrica das amostras, segundo a norma NBR 7211 (2005). Os resultados obtidos demonstraram alta variabilidade no tamanho dos grãos, os quais apresentaram granulometrias entre 0,15mm e 14mm.

Este material também é utilizado na pavimentação como base para a produção de blocos intertravado, pois segundo estudo de 2017 desenvolvido na Universidade do Estado de Minas Gerais (MALTEZ *et al.*, 2017), a escória de aciaria se apresenta como uma alternativa viável para produção dos blocos, uma vez que apresenta desempenho mecânico superior ao mínimo estabelecido na norma³ (FIG. 4).

Figura 4 – Utilização de escória de aciaria na construção de piso intertravado



Fonte: Tetracon (2017)

0.0.2. Pavimento com rejeito de mineração

A produção nacional é responsável por uma considerável parcela da produção de minério de ferro mundial. Tal fato é diretamente relacionado à ampla diversidade geológica brasileira que, associada ao tamanho do território nacional, permite a manutenção do país em posição de destaque no cenário mundial de produção mineral. A partir do exposto e da constatação de que a mineração compõe parte essencial da economia brasileira, entende-se a grande influência desse setor no

³ Para utilização no tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais (NBR 9781/2013).

desenvolvimento econômico da nação (Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM, 2015).

Entende-se por mineração o método de extração de minerais valorizados economicamente com intuito de abastecer a população (BASTOS, 2013). Assim, é de suma importância ressaltar que o minério de ferro corresponde a 87,7% das commodities de mineração geradas no país, as quais sustentam 4% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro (DNPM, 2016).

Nesse contexto, o estado de Minas Gerais é líder, detendo a maior parte da produção nacional. Além disso, a maior parte das jazidas de minério se encontra na região do quadrilátero ferrífero, localizada na parte centro-sul do estado de Minas Gerais, a qual possui uma vasta extensão de aproximados 7.000km² (DNPM, 2016).

Contudo, a exploração e o beneficiamento do minério de ferro produzem subprodutos classificados como rejeitos. A rejeição de quantidade significativa do minério é embasada na ausência das características exigidas pelo mercado consumidor. Ademais, é de conhecimento que os resíduos já citados correspondem a praticamente 40% de todo material explorado e demonstram consequências deletérias ao meio ambiente, uma vez que podem contaminar solos e assoreiam cursos d'água (YELLISHETTY; MUDD, 2014).

As características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas dos resíduos gerados pelo setor supracitado sofrem influência de alguns fatores, como especificidade do minério bruto processado, método de beneficiamento, localização na barragem de rejeitos e variedade de lavra. A destinação final dos rejeitos, seja ela por via úmida ou seca, gera significativos impactos ambientais, técnico-econômicos e de segurança. A fim de reduzir o volume de descarte desse material, foram desenvolvidos estudos para avaliar sua aplicabilidade em camadas asfálticas de base e sub-base (BASTOS, 2013; PEREIRA, 2005).

Na literatura, existem pesquisas que demonstram a viabilidade do uso de rejeitos de mineração na composição da camada de sub-base de pavimentos. Osinubi et al. (2015), avaliaram diferentes associações entre argila, cimento e rejeitos de minério de ferro. Realizaram-se ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, granulometria, resistência ao cisalhamento e compactação. A mistura ótima, capaz de aperfeiçoar as propriedades do solo, foi composta por 6% de rejeitos, 4% de cimento e 90% de solo.

Outro estudo, realizado por Etim et al. (2017), avaliou o comportamento da adição de cal e rejeitos de minério de ferro a um solo. Efetuou-se ensaios de limites de Atterberg, granulometria, densidade real, compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e resistência à compressão. O autor obteve a mistura ideal com 8% de cal e a mesma porcentagem de rejeitos.

Fernandes et al. (2004) estudaram a performance de uma associação entre rejeitos de minério de ferro e solo arenoso para as análises de caracterização e compactação ISC. Observou-se o melhor comportamento na mistura de 50% de cada material. Já Campanha (2011) adicionou aos rejeitos de mineração uma porcentagem de cimento e os submeteu à caracterização física, compactação, ISC, resistência à compressão simples e triaxial de cargas repetidas. Os resultados foram satisfatórios para adição de 10% de cimento aos rejeitos de minério de ferro. As literaturas consultadas validam a aplicabilidade dos rejeitos da mineração em camadas de sub-base asfáltica.

Por outro lado, alguns autores avaliaram o desempenho do uso de rejeitos de minério de ferro na composição de revestimentos asfálticos. Em estudo conduzido por Velasquez et al. (2009), concretos asfálticos foram acrescidos de rejeitos de minério de ferro e submetidos aos ensaios de resistência à tração indireta, flexão semicircular e módulo dinâmico. Elucidou-se pequena superioridade na performance das misturas asfálticas com rejeito se comparadas às conformadas por agregados convencionais (FIG.5).

Figura 5 – Fabricação de pavers com rejeito de minério de ferro.



Fonte: Sant'ana Filho (2017).

Silva (2010) analisou o uso de resíduos de mineração como na substituição do filler e escória. A substituição de agregados graúdos e miúdos se tornou possível,

uma vez que os rejeitos apresentaram composições diversificadas, conforme sua origem, e foram classificados pelo método DNER-ME 083/98 (1998), via peneirador mecânico convencional. Para avaliação da substituição, utilizou-se o método Marshall e o desempenho das misturas asfálticas foi constatado via ensaios de módulo de resiliência, fadiga, *creep* estático e resistência à tração por compressão diametral. A partir do trabalho constatou-se a viabilidade do uso de rejeitos de minério de ferro em concretos asfálticos.

O uso de resíduos de mineração em substituição à parte dos agregados finos das misturas asfálticas foi estudado por Aredes (2016). Foi usado o método Marshall e avaliaram-se os desempenhos pelos ensaios de módulo de resiliência e fadiga à tensão controlada e dosagem *Superpave*. Comprovou-se a possibilidade de uso de até 20% de rejeitos de minério de ferro. Ainda assim, o autor cita a possibilidade de adição de maior quantidade de rejeitos, sendo necessária a concessão dos limites granulométricos impostos pelo órgão fiscalizador e a realização de estudos que comprovem sua aplicabilidade.

Souza (2019) usou rejeitos de minério de ferro advindos do beneficiamento magnético a seco. Essa metodologia é realizada via introdução de uma estação de secagem antes da moagem, com a utilização de um grande moinho com capacidade de moer o minério sem utilizar água e da alimentação das frações mais finas em um separador magnético. Essa técnica permite aproveitar as partículas mais finas, com baixo teor de ferro e sem valor agregado, advindas de barragens de rejeitos.

A meta do trabalho supracitado foi avaliar o comportamento mecânico de três misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico, com variações dos tipos de rejeito, para comporem camadas de revestimento de pavimentos flexíveis. O autor realizou ensaios de resistência à tração por compressão diametral, dano por umidade induzida, módulo de fadiga por compressão à tensão controlada e de cargas repetidas nas misturas asfálticas, realizando ainda, uma análise econômica para estimar os gastos com as misturas asfálticas estudadas. Os resultados demonstraram plena viabilidade do uso de rejeitos de minério de ferro na pavimentação asfáltica, além da redução drástica do custo empregando os materiais alternativos (SOUZA, 2019).

0.0.3. Pavimento com resíduos da construção civil

Entende-se por resíduos de construção e demolição (RCD), denominados no presente trabalho como resíduos de construção civil (RCC), entulhos advindos de reformas, reparos, construções e demolições, cuja composição compreenda madeira, tijolos, solos, concreto, fiação e outros materiais (CONAMA, 2002). A composição dos RCC é variável e apresenta padrão regional, contudo, Grubba (2009) constatou que a maioria dos RCC gerados em solo brasileiro são compostos por materiais recicláveis inertes.

Os RCC podem ser responsáveis por inúmeros impactos ambientais se descartados de maneira inadequada e são diretamente relacionados ao assoreamento de corpos de água, obstrução de bueiros, degradação de áreas de preservação, mananciais, áreas urbanas e geração de locais propícios à multiplicação de vetores de doenças (PINTO, 1999).

A contínua geração de RCC e sua destinação incorreta podem acarretar o comprometimento de recursos naturais disponíveis para as próximas gerações. Portanto, pôde-se atrelar a necessidade de uma solução sustentável para os resíduos já citados à redução de custos e às melhorias obtidas nas misturas asfálticas a partir do acréscimo de RCC (BOTH *et al.*, 2020; TAMBARA JÚNIOR; KAUFMANN; SANTOS, 2013).

A implementação dos resíduos supracitados na mistura asfáltica depende de sua reciclagem. Essa, por sua vez, é realizada em estações de reciclagem especializada, a exemplo das estações de reciclagem de entulho da Pampulha e da BR-040 em Belo Horizonte, no Estado de Minas Gerais. O setor tem demonstrado crescimento progressivo, uma vez que os RCC, após reciclagem, possuem aplicabilidades diversificadas já comprovadas pela literatura e outras em processo de pesquisa (BELO HORIZONTE, 2021; SINDUSCON-MG, 2008).

Após a reciclagem, classifica-se os agregados quanto às composições, são eles agregados mistos e agregados reciclados de concreto (ARC). Os ARC são considerados distintos, já que são compostos por resíduos de concreto, materiais pétreos e argamassa em teor maior que 90%. Tratando-se ainda dos ARC, seu uso na massa asfáltica pode ser direcionado a pavimentos flexíveis ou rígidos, destacando-se sua aplicação na base e sub-base da estrutura asfáltica (GRUBBA, 2009).

Valença e Frota (2011), em um estudo realizado em Manaus/AM, buscaram avaliar a resistência à tração (RT) e módulo de resiliência (MR) de misturas

asfálticas com areia-asfalto usinada a quente (AAUQ) convencionais e adicionadas de fibra do açai e/ou RCC. Os resultados mostraram que a AAUQ associada a RCC de concreto de cimento *Portland* apresentaram a maior RT e menor índice de deformações a partir do ensaio de MR. Outro estudo desenvolvido por Both et al. (2020), no estado do Espírito Santo, objetivou comparar corpos de prova formados por mistura asfáltica, uma base de asfalto-borracha associado a agregados virgens, e outro composto por asfalto modificado com borracha e 10% do total de agregados substituídos por agregados reciclados. Por meio da metodologia Marshall, verificou-se que o asfalto composto por RCC atendeu às exigências do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT-ES) 112:2009, que requerem estabilidade acima de 800kgf e resistência à tração por compressão diametral maior que 0,75Mpa. Dessa forma, indicou-se possível aplicabilidade da mistura.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A sustentabilidade tem se tornado foco em todos os setores produtivos e não seria diferente com a pavimentação asfáltica. Essa indústria apresenta a capacidade de receber, transformar e aplicar resíduos inutilizáveis em seus destinos originais e possíveis causadores de grandes danos ambientais, principalmente se descartados inapropriadamente. Dessa forma, entende-se a pavimentação sustentável como uma tecnologia de alta relevância, capaz de reduzir a carga de refugos e, conseqüentemente, os impactos antropológicos sobre os diversos ecossistemas.

Aliados à sustentabilidade, têm-se os benefícios incorporados à massa asfáltica através de características intrínsecas aos resíduos usados. Por exemplo a maior aderência e durabilidade do pavimento acrescido de borracha advinda de pneus descartados; a maior aptidão de distribuição de cargas do asfalto composto por escória de aciaria; aumento da performance de massas asfálticas cujo agregados foram substituídos, em parte, por rejeitos de mineração; e a superioridade mecânica de pavimentos acrescidos de resíduos de construção civil. As vantagens supracitadas devem considerar ainda o menor custo, exceto para o pavimento composto por borracha, e facilidade logística para locais próximos a indústrias geradoras desses materiais alternativos.

Para os autores duas das tecnologias abordadas se destacaram: o pavimento de borracha e o pavimento com rejeitos de mineração. O primeiro cresce à massa

asfáltica maior durabilidade, aderência, resistência à temperatura e à deformação permanente. Tais vantagens são aliadas ao aumento progressivo da frota veicular nacional e, conseqüentemente, do descarte de pneus. A maior oneração gerada por esse pavimento seria controlada por meio do aumento de concorrência das indústrias recicladoras de pneus e auxiliaria significativamente na redução do descarte inadequado desse material.

Por outro lado, o pavimento com rejeitos de mineração apresenta solução aplicável à proibição da construção de novas barragens de rejeitos. Seu baixo custo e aplicabilidade já elucidada pela literatura nacional permitem o direcionamento desses rejeitos para uma finalidade não deletéria ao meio ambiente. Além de demonstrar utilidade nas camadas de sub-base, base e revestimento asfáltico devido às suas diferentes composições e granulometrias.

A aplicabilidade, a capacidade de preservação do meio ambiente e a viabilidade econômica dos pavimentos sustentáveis devem ser alvos de contínuos estudos, a fim de promover maior conhecimento sobre o comportamento das massas asfálticas formadas e globalizar suas utilizações. Ademais, o conhecimento de produtos com menor custo e características mecânicas e de durabilidade superiores podem representar a solução de inúmeras problemáticas existentes em solo nacional devido às mais diversas demandas e intempéries características das regiões componentes do Brasil. Por isso, os autores entendem a importância da constante atualização do setor e da realização de trabalhos que constatem composições alternativas das massas asfálticas, no intuito de ampliar a aplicação de pavimentos sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

AHMEDZADE, P.; SENGOZ, B. Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. **Journal of Hazardous Materials**, 165(1–3): 300–305. 2009.

ALVARENGA, J.C.A., **Um estudo de avaliação estrutural e econômica de pavimentos flexíveis de escória de aciaria**. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.

ARAÚJO, D. H. **Análise Comparativa do Asfalto Borracha com o Asfalto Convencional e o Asfalto com Adição de Polímeros**. UNIFOR-MG, Formiga –MG, 2015.

AREDES, M. L. A. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas utilizando resíduo do beneficiamento do minério de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.

BASTOS, L. A. C. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

BELO HORIZONTE. Superintendência de Limpeza Urbana. **Reciclagem de entulho**. Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/slu/informacoes/servicos/reciclagem-de-entulho>. Acesso em: 15 out. 2022.

BERNUCCI, L. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros/ Rio de Janeiro: PETROBRAS: ADEBA, 2006.

BERTOLLO, S. A. M. e FERNANDES JÚNIOR, J. L.; SCHALCH, V. **Benefícios da incorporação de borracha de pneus em pavimentos asfálticos**. 2002, Anais. Cancún: AIDIS/PEMISCA, 2002.

BONA, A. C. D. *et al.* Estudo sobre reciclagem da escória de aciaria em camadas de pavimentos. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.11, n.3, p.167-183, 2020.

BOTH, A. C. *et al.* Estudo do comportamento de mistura asfáltica modificada com asfalto-borracha e agregados reciclados (resíduos sólidos da construção civil). **Circuito regional de pesquisa, inovação e desenvolvimento**: Inteligência artificial: a nova fronteira da ciência brasileira, 2020.

CAMPANHA, A. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

CASTELO BRANCO, V.T. **Caracterização de Misturas Asfálticas com uso de Escória de Aciaria como Agregado**. Dissertação de Mestrado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 135 p. 2004.

CHEN, J.S.; WEI, S.H. Engineering properties and performance of asphalt mixtures incorporating steel slag. **Construction and Building Materials**, 128: 148–153. 2016.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT), Brasília. **Brasil tem apenas 12,3% da malha rodoviária com pavimento**. CNT 2016. Disponível em: <https://cnt.org.br/agencia-cnt/brasil-tem-apenas-12-da-malha-rodoviaria-com-pavimento>. Acesso em: 15 out. 2022.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Destinação final de Resíduos da Construção Civil**. Resolução nº307, de 05 de julho de 2002.

COSTA, W. F. S.; CHOQUE FERNANDEZ, O. J.; SOUSA, M. S. C. Caracterização de escórias de aciaria e de alto-forno produzidas em usinas ao longo da estrada de ferro carajás para aplicação industrial. **XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, Belo Horizonte, nov. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Pesquisa de asfaltos modificados por polímeros**: DNER – ME. Rio de Janeiro, Tomos I, II e III. 1998a.

DIÁRIO POPULAR. Escória da Usiminas é usada em projetos de sustentabilidade. 2016. Disponível em: <http://www.diariopopularmg.com.br/escoria-da-usiminas-e-usada-em-projetos-de-sustentabilidade/>. Acesso em: 6 dez 2022.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). **ME 083**, Agregados – Análise Granulométrica.

DNIT, Espírito Santo. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de serviço**. DNIT, 112, 2009. 13 p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_112_2009_es.pdf. Acesso em: 6 dez. 2022.

DNIT, Rio de Janeiro. **Manual de Pavimentação**. DNIT, 2006. 278 p. Disponível em: https://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf. Acesso em: 10 out. 2022.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral. Brasília**: DNPM, 2016.

EMERY, J. **Steel slag utilization in asphalt mixes**. Canadian Technical Asphalt Association Proceedings, Brampton, Canadá, 11 p. 1984.

ETIM, R. K.; EBEREMU, A. O.; OSINUBI, K. J. Stabilization of black cotton soil with lime and iron ore tailings admixture. **Transportation Geotechnics** 10 (2017) 85-95.

FAXINA, A.L. **Estudo em Laboratório do Desempenho de Concreto Asfáltico Usinado a Quente Empregando Ligante Tipo Asfalto-Borracha**. 112 f. Dissertação de Mestrado, EESC, São Carlos, SP, Brasil, 2002.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Inventário de barragem do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: FEAM, 2016.

FERNANDES, G.; RIBEIRO, L. F. M.; GOMES, R. C.; PALMEIRA, E. M.; PEREIRA, R, A. **Estudo de resíduos de minério de ferro para utilização em pavimentos**. ICTR 2004 – Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento sustentável. Costão do Santinho, Florianópolis, Santa Catarina, 2004.

FREITAS, H. B.; MOTTA, L. M. G. Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado. **Revista Transportes**, [s. l.], v. XVI, n. 2, p. 5-12, dezembro 2008.

GEISELER, J. **Use of steelworks slags in Europe**. Waste Management, 16(1–3): 59– 63. 1996.

GOMES, A. C. F. **Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração**. Belo Horizonte, 2017.

GONÇALVES, F. P. **Estudo experimental do desempenho de pavimentos flexíveis a partir de instrumentação e ensaios acelerados**. 395 f. Tese de Doutorado. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

GROENNINGER, J.; WISTUBA, M. P. Performance properties of asphalt mixture containing Linz-Donawitz (LD) steel slag. **The 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields**, 319–325. 2017.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária**. 163p. Dissertação – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

HEITZMAN, M. **Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier**. Transp. Res. Rec., TRB, Washington, DC, n.1339, p.01-08, 1992.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **A siderurgia em números 2022**. 27p. Rio de Janeiro, maio 2022.

Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM. **Informações sobre a economia mineral brasileira 2015**. Instituto Brasileiro de Mineração, 2015.

KANDHAL, P.S.; HOFFMAN, G.L. Evaluation of steel slag fine aggregate in hotmix asphalt mixtures. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, 1583: 28–36. 1997.

LEITE, J. R. S. J. **A UTILIZAÇÃO DE ASFALTO-BORRACHA NA CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS**: Viabilidade Técnica e Sustentabilidade. Universidade Potiguar, 2021.

LIMA, C. **Caracterização de ligantes asfálticos modificados com borracha de pneu e aditivo**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, 2008.

LIMA, L. C. **O ensaio DCP aplicado no controle de qualidade de compactação de obras viárias executadas com solos lateríticos de textura fina**. 149 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, São Paulo, 2000.

MALTEZ, N. G. *et al.* Potencialidade do uso da escória de aciaria na produção de blocos de concreto para pavimentação. **6ª Reunião Anual da SBPC**, Belo Horizonte/MG, jul. 2017.

MOHAN, Y.; MUDD, G. Substance flow analysis of steel and long term sustainability of iron ore resources in Australia, Brazil, China and India. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 84, ed. 1, p. 400-410, December 2014.

NEVES, F.C. L. D. **Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas SMA Produzidas com Ligante Asfalto - Borracha**. 118f. Dissertação de Mestrado. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2004.

Nóbrega, L. M., 2007, **Caracterização Mecânica de Misturas Asfáltica Utilizando Escória de Ferroliga de Manganês como Agregado**. Dissertação de M.Sc., UFBA, Salvador, BA, Brasil. 2007.

ODA, S.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 23, p. 1589-1599, 2001.

OSINUBI, K. J.; YOAHANNA, P.; EBEREMU, A. O. Cement modification of tropical black clay using iron ore tailings as admixture. **Transportation Geotechnics**, v.5, p.35-49, 2015.

PASSETO, M.; BALDO, N. Performance comparative analysis of stone mastic asphalts with electric arc furnace steel slag: a laboratory evaluation. **Materials and Structures**, 45: 411–424. 2012.

PEDROSA, R. A. A. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica do Uso de Agregados de Escória de Aciaria em Concreto Betuminoso Usinado a Quente**. Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, MG, 113 p. 2010.

PEREIRA, E. L. **Estudo potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estatístico**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduo sólido da construção urbana**. São Paulo, 1999.

RUTH B.E. et al. **Recycling of asphalt mixtures containing crumb rubber**. Final Report. FL/DOT/MO D510717. Florida: University of Florida. Florida Department of Transportation, 1997.

SANT'ANA FILHO, Joaquim Nery *et al.* Technical and environmental feasibility of interlocking concrete pavers with iron ore tailings from tailings dams. **American Society of Civil Engineers**, [s. l.], 2017.

SANTOS, A.C. **Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir de reciclagem de pneus com aplicação em placas pré-moldadas**. 2008.

SILVA, E. A. Uso de escória de aciaria em pavimentação viária. In: Reunião Anual de Pavimentação, 28., Rio de Janeiro. **Anais...**, Rio de Janeiro:ABPv, p.261-283, 1994.

SILVA, R. G. O. **Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SIMONETTI, Henrique. **Estudo de impactos ambientais gerados pelas rodovias: sistematização do processo de elaboração de EIA/RIMA**. 2010. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SINDUSCON-MG. **Obra limpa**. Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <https://www.sinduscon-mg.org.br/obra-limpa/>. Acesso em: 11 out. 2022.

SORLINI, S.; SANZENI, A.; RONDI, L. Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures. **Journal of Hazardous Material**, [s. l.], v. 209-210, p. 84-91, 30 maio 2012.

SOUZA, E. B. O. **Escória de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2007.

SOUZA, T. D. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos dosados com rejeitos finos de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2019.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha recicladas de pneus**. 2004. 280 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TAKALLOU, H.B.; SAINTON, A. **Advances in technology of asphalt paving materials containing used tire rubber**. Transp. Res. Rec., Washington, D.C., n.1339, p.23- 29, 1992.

TAMBARA JÚNIOR, L. U. D.; KAUFMANN, M.; SANTOS, F. F. Uso de resíduos da construção civil como sub-base no asfalto. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 3, n. 2, 3 fev. 2013.

TERRA JÚNIOR. **Pavimentação até 60% mais barata pode ser a solução para estradas rurais no sul do estado do Rio de Janeiro**. [S. l.], 22 nov. 2017. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/sul-do-rio-costa-verde/especial-publicitario/terra-junior/noticia/pavimentacao-ate-60-mais-barata-pode-ser-a-solucao-para-estradas-rurais-no-sul-do-estado-do-rio-de-janeiro.ghtml>. Acesso em: 6 dez. 2022.

TETRACON. **Blocos para pavimentação com escória de siderurgia**. [S. l.], 15 jun. 2017. Disponível em: <https://tetraconind.com.br/blog/blocos-para-pavimentacao-com-escoria-de-siderurgia/>. Acesso em: 6 dez. 2022.

VALENÇA, P. M. A.; FROTA, C. A. Misturas areia-asfalto com fibra do açaí e resíduo da construção civil para a cidade de Manaus. **T&C Amazônia**, [s. l.], ano IX, n. 21, p. 50-54, II semestre 2011.

VELASQUEZ, R.; TUROS, M.; MOON, K. H.; ZANKO, L.; MARASTEANU, M. Using recycled taconite as alternative aggregate in asphalt pavements. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 3070-3078, abr. 2009.

WACHSMUTH, F., GEISELER, J., FIX, W., KOCH, K.; SCHWERDTFEGER, K. **Contribution to the structure of BOF-slugs and its influence on their volume stability**. Canadian Metallurgical Quarterly, 20(3): 279–284. 1981.

WANG, G., WANG, Y.; GAO, Z. Use of steel slag as a granular material: volume expansion prediction and usability criteria. **Journal of Hazardous Materials**, 184: 555–560. 2010.

WU, S. *et al.* Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. **Building and Environment**, [s. l.], v. 42, ed. 7, p. 2580-2585, jul. 2007.

YELLISHETTY, M.; MUDD, G. M. Substance flow analysis of steel and long term sustainability of iron ore resources in Australia, Brazil, China and India. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 84, p. 400-410, dez. 2014.

ZANZOTTO, L.; KENNEPOHL, G. J. Development of rubber and asphalt binders by depolymerization and devulcanization of scrap tires in asphalt. **Transportation Research Record. Washington**, n.1530, p.51-58. 1996.