VIABILIDADE TÉCNICA E ECONOMICA DA INCORPOAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA EM PAVIMENTAÇÃO.

Iasmin Roberta Lobo da Rocha*
Liércio Motta (Orientador do trabalho)**

RESUMO: O estudo avalia a viabilidade técnica e econômica do uso da escória de aciaria como substituto parcial de agregados minerais na pavimentação, propondo uma alternativa sustentável para pavimentos asfálticos. A introdução ressalta a importância ambiental da reutilização da escória, reduzindo descartes industriais e preservando recursos naturais. O estudo explora tipos de pavimentos (rígidos e flexíveis) e suas camadas estruturais, os processos de construção, e ensaios laboratoriais, como o CBR e o Proctor, para avaliar a resistência do solo e dos materiais. Também detalha a produção do aço, destacando a formação e composição da escória, fundamentais para sua aplicação. Os desafios incluem o tratamento da escória para reduzir sua expansão, com métodos como a estabilização química, visando uma aplicação segura e eficaz. A pesquisa busca comprovar que a escória de aciaria, quando tratada, é uma solução viável e sustentável para pavimentação, promovendo a economia circular e reduzindo custos e impactos ambientais na construção civil e infraestrutura viária.

Palavras-chave: Escória de aciaria, pavimentação, brita graduada simples.

ABSTRACT: The study assesses the technical and economic feasibility of using steel slag as a partial substitute for mineral aggregates in pavement, proposing a sustainable alternative for asphalt pavements. The introduction highlights the environmental importance of reusing slag, reducing industrial waste, and preserving natural resources. The study explores types of pavements (rigid and flexible) and their structural layers, construction processes, and laboratory tests, such as the CBR and Proctor, to evaluate soil and material resistance. It also details steel production, emphasizing slag formation and composition, which are essential for its application. Challenges include treating slag to reduce expansion, with methods such as chemical stabilization, aiming for safe and effective use. The research seeks to demonstrate that, when properly treated, steel slag is a viable and sustainable solution for pavement, promoting circular economy practices and reducing costs and environmental impacts in civil construction and road infrastructure.

Keywords: Steel slag, pavement, graded aggregate

---

* Rede de Ensino Doctum – Unidade Juiz de Fora – aluno.iasmin.rocha@doctum.edu.br – graduanda em Engenharia Civil
**Rede de Ensino Doctum – Unidade Juiz de Fora - liercioengenhariajf@doctum.edu.br – orientador do trabalho

1- Introdução:

Entre as diversas preocupações ambientais que circundam o mundo, o resíduo gerado pela indústria produtora de aço é um assunto significativo para o meio ambiente.

A reutilização da escória de aciaria não é apenas uma questão de eficiência econômica, mas também uma responsabilidade ambiental. Ao transformar um subproduto industrial em recurso, não apenas reduzimos o desperdício e os custos de eliminação, mas também contribuímos para a preservação dos recursos e a sustentabilidade do nosso planeta.

É possível afirmar, que segundo as pesquisas realizadas pelo Laboratório de reciclagem, tratamento de resíduos e extração, os projetos de aplicação da escória de aciaria se desenvolveram no sentido de usar este resíduo em materiais de construção, como por exemplo, concreto, argamassa e base asfáltica. Porém, estudos mostraram que esta utilização tem restrições no que se refere à capacidade de hidratação da escória de aciaria após sua utilização, fazendo com que os materiais fabricados tenham sua integridade física comprometida. O Laboratório LAREX da USP que é referência em reaproveitamento de resíduos industriais aponta que aproximadamente 30% da escória de aciaria gerada no Brasil e 20% da produção global desse material não são reutilizados. Esses resíduos são armazenados em amplas áreas nos parques industriais, gerando custos adicionais para sua estocagem.

Ao mesmo tempo, se sabe que a principal via utilizada para o transporte é a rodoviária, onde milhões de passageiros e volumosas cargas constantemente transitam, gerando deterioração nas vias.

O transporte rodoviário é o mais utilizado no Brasil para o deslocamento de cargas e passageiros, realizado através de estradas e rodovias por veículos como carros, ônibus e caminhões. O setor de transportes no país tem mostrado expansão e avanços em diversos aspectos nas últimas décadas, embora ainda enfrente desafios em termos de qualidade e eficiência. Dados da Agência Nacional de Transporte Terrestres (ANTT, 2022) indicam que aproximadamente 60% dos transportes no Brasil são feitos por rodovias, 20% por ferrovias, 13% por hidrovias e 4% por aerovias e dutos.

Aspectos como o contínuo aumento dos custos dos materiais e dos serviços tem tornado a manutenção das estradas cada vez mais dispendiosa. Levando assim, a priorização de medidas para o aumento da durabilidade do pavimento, visando

melhorias em relação ao custo x benefício, com isso, apresenta-se a possibilidade do uso da escória na infraestrutural do pavimento.

O uso da escória tem apresentado potenciais vantagens econômicas e técnicas fortemente recomendadas, especialmente em regiões onde é produzido o aço em grande escala.

O estudo para o reaproveitamento desse subproduto proveniente da produção de aço, é uma alternativa encontrada para possibilitar a solução das adversidades apresentadas.

Este estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica da utilização da escória como substituto do agregado mineral no processo de pavimentação. Para isso, foram realizadas análises para determinar as propriedades mecânicas e de desempenho da escória em comparação com o BGS. Além disso, será conduzida uma análise de viabilidade econômica considerando os custos de produção, manutenção e durabilidade do pavimento. Os resultados obtidos serão utilizados para fornecer recomendações práticas para a aplicação eficaz da escória como componente da pavimentação, visando promover uma alternativa sustentável e economicamente viável na construção de pavimentos asfálticos.

A utilização de materiais alternativos na construção civil tem sido objeto de crescente interesse devido à busca por soluções mais sustentáveis e economicamente viáveis. Nesse contexto, o emprego da escória como substituto do agregado mineral apresenta-se como uma alternativa promissora. A escória, resíduo da indústria siderúrgica, possui propriedades que podem melhorar as características mecânicas e de durabilidade do pavimento asfáltico, ao mesmo tempo em que proporciona uma destinação adequada para um resíduo industrial.

No entanto, apesar do potencial benefício técnico e ambiental da utilização da escória na pavimentação, ainda há lacunas a serem preenchidas quanto à sua viabilidade técnica e econômica em diferentes contextos. A investigação aprofundada desses aspectos é crucial para embasar decisões na seleção de materiais de construção e para promover práticas mais sustentáveis no setor da construção civil.

Portanto, este estudo se justifica pela necessidade de preencher essa lacuna de conhecimento, fornecendo uma análise abrangente da viabilidade técnica e econômica da utilização do subproduto. Os resultados obtidos contribuirão não apenas para o avanço do conhecimento científico nessa área, mas também para a

promoção de práticas mais sustentáveis e economicamente vantajosas na construção de pavimentos asfálticos.

2- Pavimentação:

O pavimento é uma estrutura formada por múltiplas camadas com finitas espessuras e construída sobre a superfície de terraplanagem. Tem como principal objetivo resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos, além disso, pode considerar como um objetivo maior segurança, conforto e economia aos usuários da rodovia.

As camadas do pavimento são projetadas com espessuras e rigidez especificas adequadas às condições geométricas, climáticas e de acordo com a vida útil que essa estrutura deve corresponder.

É importante citar que os pavimentos são divididos em três categorias. O rígido, semiflexível e o flexível, como pode se observar no quadro 1 abaixo.

Quadro 1: Tipos de pavimentos

Tipos de pavimento	Descrição	Aplicações comuns
Rígido	São constituídos por camadas que trabalham essencialmente à tração. Baseado nas propriedades resistentes das placas de concreto de cimento Portland, as quais são rejuntadas entre si e apoiadas em uma camada de transição, a sub-base. A determinação da espessura é dada a partir da resistência à tração do concreto e são feitos ensaios de fadiga, coeficiente de reação do sub-leito e cargas aplicadas. São caracterizados por serem pouco deformáveis (alta rigidez), alta resistência e pequenas espessuras, com uma vida útil maior. O dimensionamento do pavimento flexível é comandado pela resistência do sub-leito e do próprio pavimento rígido.	Vias urbanas de transporte público, estacionamentos de veículos pesados, pátios industriais, rodovias de alto tráfego.
Flexível	São aqueles constituídos por camadas que não trabalham à tração. Normalmente são constituídos de revestimento betuminoso delgado sobre camadas granulares. A capacidade de suporte é função das características de distribuição de cargas por um sistema de camadas superpostas, onde as de melhor qualidade encontram-se mais próximas da carga aplicada. No dimensionamento tradicional são consideradas as características geotécnicas dos materiais a serem usados, e a definição da espessura das várias camadas depende do valor da CBR e do mínimo de solicitação de um eixo padrão.	Pistas de ciclovia e caminhadas, vias de trânsito local, rodovias urbanas e rurais, estacionamentos de veículos leves.
Semi-flexível	Combina características de pavimentos rígidos e flexíveis, utilizando uma base tratada com ligantes hidráulicos e uma camada asfáltica porosa preenchida com emulsão asfáltica ou calda de cimento. Esta combinação proporciona alta resistência e flexibilidade, resultando em menor risco de fissuras e maior durabilidade.	Terminais de cargas e logísticas, estacionamento de veículos pesados, portos, aeroportos.

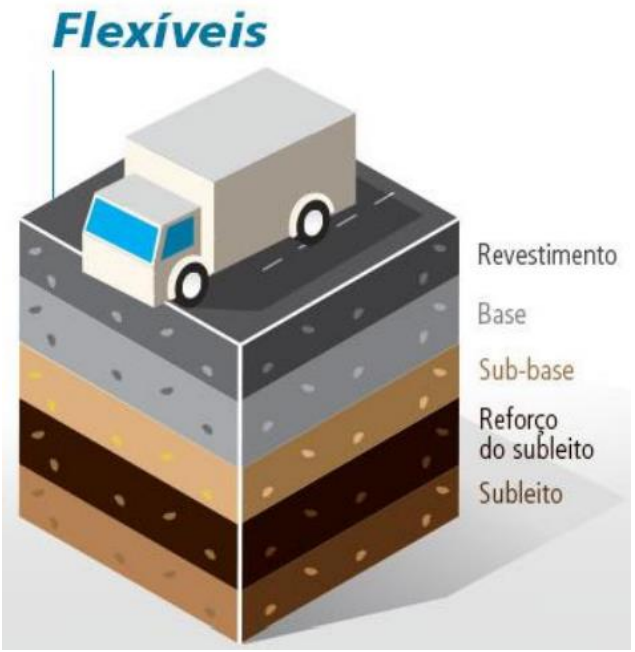
Fonte: Adaptado pela autora do Manual de pavimentação – DNIT, 2006.

Devemos ressaltar que, como citado por Palharini e Sousa (2022), as estruturas dos pavimentos podem ser classificadas como rígidas ou flexíveis.

Com base no quadro anterior, observamos que cada tipo de pavimento reage de maneira distinta às cargas aplicadas. O esquema a seguir ilustra como os pavimentos flexíveis e rígidos suportam essas cargas:

2.1- Os pavimentos flexíveis: Distribuem as cargas sobre uma área mais ampla através das várias camadas do pavimento, adaptando-se às deformações do solo, conforme pode ser observado na figura 1.

Figura 1: A distribuição de tensões em um pavimento flexível

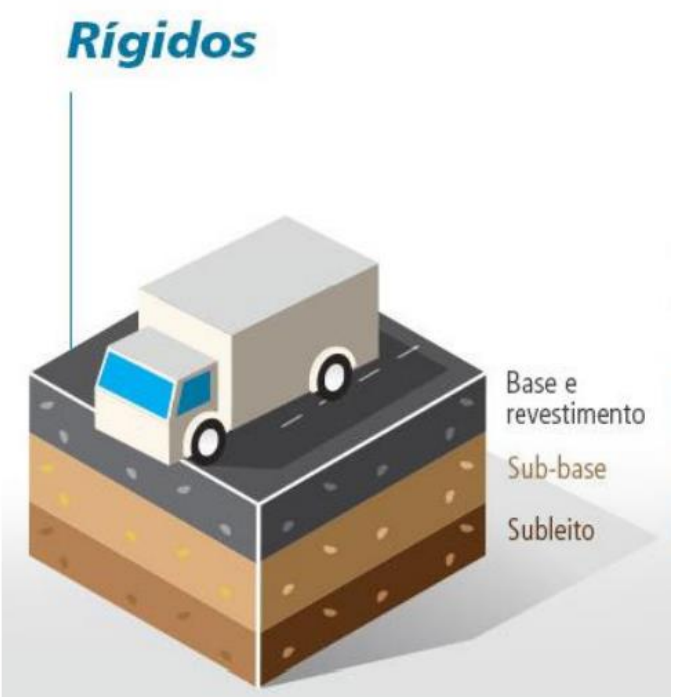


Fonte: Batista, 2016

A figura 1 apresenta a estrutura de um pavimento flexível e a distribuição de tensões ao longo de suas camadas. Esse tipo de pavimento é projetado para distribuir as cargas sobre uma área maior, o que ajuda a reduzir as tensões transmitidas às camadas inferiores. A flexibilidade do pavimento permite que ele se adapte às deformações do solo, garantindo maior durabilidade e resistência ao longo do tempo. Cada camada desempenha uma função específica: o revestimento oferece resistência ao desgaste; a base e a sub-base contribuem para a distribuição de carga e estabilidade; enquanto o reforço do subleito e o próprio subleito servem como fundação, suportando o peso e as tensões remanescentes. Esse sistema em camadas evidencia a complexidade e a importância do dimensionamento adequado em pavimentos rodoviários, fundamental para garantir a segurança e o conforto dos usuários.

2.2 – Os pavimentos rígidos: Suportam as cargas diretamente através de sua elevada resistência à compressão, com menor deformação, mas maior susceptibilidade a fissuras, como pode-se observar na figura 2.

Figura 2: A distribuição de tensões em um pavimento rígido



Fonte: Batista, 2016.

Caracterizado pela sua alta resistência à compressão e suportando diretamente as cargas aplicadas com menor deformação, esse é o pavimento rígido. Essa resistência, no entanto, torna-o mais suscetível ao surgimento de fissuras, especialmente sob condições de carga repetitiva e variações térmicas. A estrutura dos pavimentos rígidos geralmente inclui uma camada de base e revestimento de concreto, que atua de maneira mais independente do material do subleito.

2.3- Estrutura do pavimento:

A estrutura do pavimento é a composição física e funcional das camadas que compõem uma via pavimentada, sendo projetada para suportar o tráfego de veículos e distribuir as cargas de maneira eficiente para garantir a durabilidade e segurança.

A estrutura de pavimento consiste em várias camadas, cada uma com uma função específica, assim como apresentado no quadro 2.

Quadro 2: Estrutura do pavimento.

Subleito	A camada de solo natural localizada abaixo do pavimento. O subleito deve ser compactado e nivelado para proporcionar uma base sólida e estável para o pavimento.
Base	A base é uma camada de material granular, como brita ou cascalho, que é colocada sobre o subleito. Ela distribui as cargas do tráfego de maneira uniforme e ajuda a evitar a penetração de umidade no subleito.
Sub-base	Em algumas estruturas de pavimento, pode haver uma camada de sub-base entre a base e o revestimento asfáltico. Esta camada auxilia na drenagem e no reforço da base, proporcionando uma superfície mais estável para o revestimento asfáltico.
Revestimento	É a superfície final da estrada que os veículos utilizam. É composto pelo CBUQ ou outro tipo de asfalto, e sua qualidade influencia diretamente na resistência, durabilidade e segurança da estrada

FONTE: Adaptado pela autora do Manual de pavimentação - DNIT, 2006

Além dessas camadas principais, outras podem ser incluídas, como camadas de reforço, drenagem e barreiras de umidade, dependendo das condições específicas do local e dos requisitos de projeto.

Segundo Liedi Bariani Bernucci (2008 – pág. 11) no livro `Pavimentação Asfáltica' definiu que "os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados, filler e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito."

2.4-Processo construtivo do pavimento:

Para dar início ao processo construtivo do pavimento, o primeiro passo é a escolha de um profissional que tenha capacidade elevada, envolvendo entendimento das propriedades dos materiais utilizados no processo, a ser seguido é o planejamento e o projeto, onde iremos iniciar as análises preliminares do solo, obter informações do tráfego que será comportado pela rodovia, definir qual será o tipo de pavimento mais adequado e finalizando a parte inicial, o desenvolvimento do projeto seguindo as normas e orientações descritas no DNIT, juntamente com seus orçamentos, e a definição do material a ser utilizado nas camadas inferiores.

Já no campo de obra, é iniciado com as máquinas de terraplanagem a partir da limpeza da vegetação existente no terreno, realizando o devido nivelamento e compactação do terreno, após é realizado um ensaio de CBR no solo, seguindo a norma da ABNT NBR:9895:201, para verificarmos se é necessária a implantação de uma camada de reforço para o subleito.

O próximo passo é regido pela norma ABNT NBR 9895:2016 onde é especificado o método para a determinação do valor do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e da expansão dos solos em laboratório, este método é importante para avaliar a resistência e a capacidade de suporte do solo, características importantes para a construção de estradas e pavimentos.

Ao finalizarem a etapa anterior dos ensaios, é iniciada uma das fases mais importantes que é a fase de construção da sub-base e da base. Nessa fase, é de extrema importância que sejam seguidas as diretrizes da norma ABNT NBR 7182:2016, que define o nível de compactação do solo, utilizando a execução do ensaio de compactação pelo método de Proctor.

A norma ABNT NBR 7182:2016 estabelece o método para determinar a relação entre o teor de umidade e a densidade seca máxima dos solos compactados, utilizando o ensaio de compactação pelo método de Proctor, este ensaio envolve a preparação das amostras de solo, que são compactadas em camadas dentro de um cilindro utilizando um soquete específico. Cada camada é compactada com um número definido de golpes, e a densidade seca e o teor de umidade são medidos para criar uma curva de compactação. Essa curva identifica a umidade ótima para obtermos a densidade máxima do solo, necessária para os projetos que exigem solos compactados, como é o caso da pavimentação.

Finalizando o processo, são aplicadas as misturas asfálticas em seus locais e espessuras definidas em projeto, com o objetivo de proporcionar maior conforto e segurança aos seus usuários, após seu lançamento, as misturas são compactadas com o auxílio de um o rolo de pneus, para a redução dos índices de vazios.

2.5 - Brita Graduada Simples:

A brita graduada simples é um material amplamente utilizado na construção de pavimentos, especialmente em camadas de base e sub-base de rodovias. Composta por uma mistura de agregados de diferentes granulometrias, a brita graduada simples é valorizada por suas propriedades mecânicas e sua capacidade de proporcionar uma base estável e durável para as camadas superiores do pavimento.

Como citado por David Anjos dos Santos em seu livro ‘Viabilidade e a Qualidade da utilização da Escória de Aciaria como agregado na Pavimentação’ (2021 – pág. 16) a brita ou agregado mineral é um material derivado de rochas que sofreram processos geológicos e são extraídas da sua matriz através de processos de explosão ou pelo processo natural de desmonte.

2.6- Escória de aciaria:

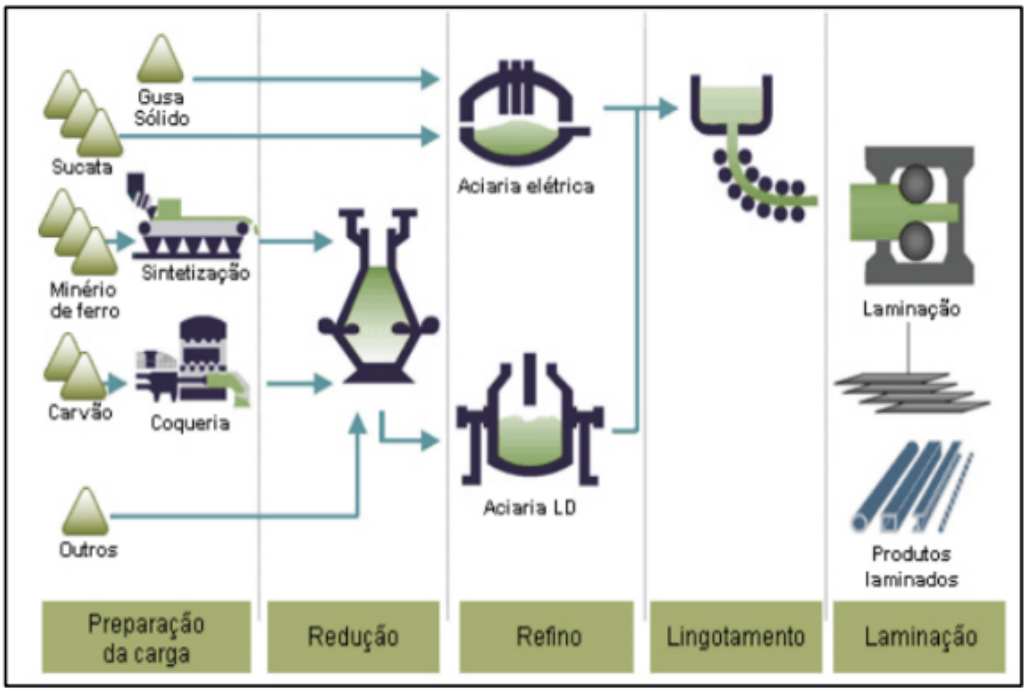
A escória de aciaria é um subproduto da produção de aço, originada durante os processos de refino e purificação do ferro-gusa (ou ferro fundido) no forno de aço. Esse processo é essencial para remover impurezas e ajustar a composição química do aço. A escória é formada pela reação entre os materiais fundentes (como calcário), as impurezas do minério de ferro, e outros aditivos.

As escórias de aciaria produzidas pela siderúrgica são gerados em grandes quantidades e podem ser uma alternativa econômica e ambientalmente viável em

comparação com recursos naturais utilizados para obras de pavimentação, bem como, o BGS, tendo como consequência uma redução no valor final da obra. A cada tonelada de aço líquido processado, são gerados cerca de 450 a 550 quilogramas de escória de aciaria (ANJOS, 2021).

A figura 7 apresenta um diagrama que descreve o processo de fabricação do aço, desde a preparação das matérias-primas até a etapa de laminação final.

Figura 7- Diagrama ilustrando o processo de fabricação do aço.



Fonte: Instituto do Aço (2020)

Inicialmente na fabricação do produto, ocorre a preparação da carga, composta por sucata, minério de ferro, carvão e outros materiais. Em seguida, esses componentes passam pela etapa de redução, onde o minério de ferro é transformado em ferro-gusa. Na fase de refino, o ferro é convertido em aço nas aciarias. Após o refino, o aço passa pelo processo de lingotamento e, posteriormente, pela laminação, originando produtos laminados. A escória é gerada durante o refino e pode ser reaproveitada em aplicações como materiais de pavimentação.

Segundo dados apresentados pelo Instituto do aço (2020), existem dois tipos de queima em que é gerada a escória de aciaria:

2.6.1 Forno de Arco Elétrico (FAE):

- O forno de arco elétrico é utilizado principalmente para reciclar sucata de aço. Nele, a sucata é aquecida por meio de arcos elétricos, derretendo o material. Durante esse processo, formam-se impurezas que se acumulam na superfície do metal fundido.
- Materiais fundentes, como calcário ou dolomita, são adicionados para combinar com as impurezas (como óxidos de silício, fósforo, enxofre e outros). Isso resulta na formação de uma camada de escória que flutua sobre o metal fundido, facilitando a sua remoção.

2.6.2- Forno Básico de Oxigênio (FBO):

- No forno básico de oxigênio, o ferro-gusa é refinado por meio da injeção de oxigênio puro, que oxida as impurezas. O calcário é adicionado como fundente para ajudar na formação da escória.
- A escória formada neste processo contém óxidos de cálcio, silício, alumínio, ferro, fósforo e outros elementos que são removidos do metal fundido.

2.6.3 Componentes da escória de aciaria:

A escória de aciaria é composta por uma variedade de óxidos e outros elementos resultantes do processo de fabricação do aço. Cada componente da escória desempenha um papel importante em sua composição e propriedades. Entre os principais componentes estão:

Componente	Descrição
Óxidos de Cálcio (CaO)	Derivados do calcário adicionado como fundente.
Óxidos de Silício (SiO_2)	Originados das impurezas no ferro-gusa e dos fundentes.
Óxidos de Ferro (FeO)	Resultantes da oxidação do ferro.
Óxidos de Alumínio (Al_2O_3)	Presentes devido às impurezas e ao uso de alumina como fundente.
Óxidos de Magnésio (MgO)	Adicionados como fundentes ou presentes nas matérias-primas.
Fósforo e Enxofre	Removidos do metal fundido e capturados na escória.

Fonte: Adaptado pela autora do Congresso Anual da ABM (2019).

A escória resultante pode ser processada e utilizada em diversas aplicações, como exemplifica o diagrama abaixo apresentado pela figura 8.

Figura 8: Diagrama de aplicações do subproduto

Fonte: Elaborado pela autora.

Quando devidamente tratada, essa substância se torna um material versátil, aplicável em diversas áreas. Na construção rodoviária e ferroviária, por exemplo, a escória pode substituir agregados convencionais, conferindo resistência e durabilidade às infraestruturas. No setor de produção de cimento, ela pode ser incorporada ao processo, o que reduz a necessidade de extração de recursos naturais e as emissões de CO_2 associadas à fabricação convencional. Além disso, a escória é utilizada como substituto parcial do cimento Portland em concreto, melhorando a resistência e a durabilidade do material final.

Na agricultura, a escória de aciaria é aproveitada como corretivo agrícola devido aos nutrientes que oferece ao solo, auxiliando na melhoria da qualidade do solo e no aumento da produtividade. Em sua forma granular, também é utilizada como agregado em concreto e outras construções, proporcionando economia de recursos e contribuindo para uma gestão mais sustentável de resíduos industriais. Assim, as múltiplas aplicações da escória de aciaria promovem a economia circular e ajudam a

minimizar o impacto ambiental, direcionando de forma sustentável um subproduto da indústria siderúrgica.

O tipo de agregado artificial atualmente mais utilizado em pavimentação são os vários tipos de escórias, subprodutos da indústria do aço (SCHUMACHER, 2018).
O emprego desse agregado na pavimentação abrange desde a camada de sub-base e base até a camada de revestimento, incluindo os tratamentos superficiais como por exemplo o concreto asfáltico. No entanto, é fundamental destacar um ponto de atenção em relação às escórias de aciaria, que é a possibilidade de expansão desse material e a inexistência de critérios técnicos para detectar sua estabilização. Nesse caso, para a aplicação na pavimentação, são necessários alguns tratamentos específicos visando mitigar esse potencial expansivo, conforme apresentado no quadro 3, é possível observar as diversas metodologias disponíveis para o tratamento e cura da escória de aciaria.

Quadro 3: Tratamentos na escória de aciaria sólida

Tratamento	Descrição	Momento de Atuação	Pontos Fortes	Pontos Fracos	Eficácia
Cura ao tempo (weathering) (ACERITA - caso particular)	Exposição ao tempo – ocasionalmente com molhagem	Após a geração com escória sólida	Baixo custo e simplicidade	Demorado; Falta de definição metodológica; Heterogeneidade	Variável
Cura a vapor sob pressão atmosférica (open yard)	Injeção de vapor à escória	Após a geração com escória sólida	Redução considerável dos teores de CaO e MgO livres	Alto custo, principalmente se não há rede de vapor disponível	Alta
Cura a vapor sob pressão (SKAP)	Injeção de vapor à escória em autoclave	Após a geração com escória no estado sólido	Redução considerável dos teores de CaO e MgO livres	Alto custo	Muito Alta

Fonte: Maristela Gomes da Silva, Diretora centro tecnológico UFES (2014)

O quadro acima, apresenta os métodos de tratamento aplicados à escória de aciaria sólida. São mencionados três tipos principais de cura: cura ao tempo (ou weathering), cura a vapor sob pressão atmosférica, e cura a vapor sob pressão em autoclave. Cada

método possui momentos específicos de aplicação e características próprias. Por exemplo, a cura ao tempo é de baixo custo e simples, mas é um processo demorado e apresenta variabilidade de resultados. Já o tratamento com cura a vapor em autoclave possui alta eficiência, reduzindo significativamente os teores de CaO e MgO livres, mas envolve um custo elevado. Esses tratamentos visam melhorar a estabilidade e o aproveitamento da escória na produção industrial.

A maior preocupação com o uso deste material em camadas de pavimentos rodoviários é seu potencial de expansão, principalmente devido à presença de óxidos de cálcio e de magnésio livres em sua composição.

Especialistas relatam que o uso de escórias não curadas pode ocasionar defeitos no pavimento, tais como trincas radiais e longitudinais no revestimento e deslocamento rotacional de sarjetas.

A escória de aciaria tem potencial de substituir os agregados naturais, tais como: cascalhos, materiais britados, rochas, areias, calcários. Outro benefício é a possível transformação de um potencial passivo ambiental em ativo, evitando a destinação dos materiais a aterros, empregando-o em fins nobres, com custos atrativos no mercado dependendo de sua distância média (ANJOS, 2021).

O método mais comum para mitigar essa desvantagem é o processo de tratamento realizado no pátio, no qual ela é umedecida com água, tanto natural quanto aquecida, com a intenção de hidratar os componentes instáveis, conforme explicado por Rohde (2002).

De acordo com as diretrizes do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, a escória deve ser exposta ao ar livre por, no mínimo, seis meses. Após esse período, é necessário avaliar suas propriedades expansivas antes de aplicá-las em qualquer contexto, as vantagens da escória da aciaria residem na sua ampla gama de aplicações, tanto dentro do processo siderúrgico quanto em outras operações, conforme destacado pela ArcelorMittal Brasil.

2.7– Normatização da Escória:

As primeiras normas do DNIT associadas à utilização do agregado siderúrgico em camadas de pavimento rodoviário foram publicadas em 2009, após uma extensa campanha de ensaios laboratoriais e acompanhamento do desempenho de trechos experimentais no Rio de Janeiro.

Desses estudos, foram publicadas as seguintes normas:

- **DNIT 115/2009 - ES (Pavimentação rodoviária - base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - acerita):** Estabelece as diretrizes para a pavimentação rodoviária utilizando base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria, conhecida como acerita. Essa especificação técnica aborda os critérios de seleção do material, métodos de execução, controle de qualidade e procedimentos de ensaio, visando garantir a performance adequada e a longevidade do pavimento. A norma inclui requisitos detalhados sobre a preparação da mistura, a compactação, e o tratamento necessário para mitigar a expansão potencial da escória, assegurando sua estabilidade e funcionalidade em aplicações rodoviárias.
- **DNIT 114/2009 - ES (Pavimentação rodoviária - sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - acerita):** Especifica as diretrizes para a pavimentação rodoviária com sub-base estabilizada granulometricamente utilizando escória de aciaria, também conhecida como acerita. Esta norma técnica detalha os requisitos para a seleção do material, os métodos de execução, o controle de qualidade e os procedimentos de ensaio. O objetivo é garantir a adequada performance e durabilidade da sub-base em pavimentos rodoviários. A norma inclui os critérios de seleção do material, métodos de execução, controle de qualidade e tratamento para expansão.

  Essa especificação visa assegurar que a sub-base estabilizada granulometricamente com acerita forneça suporte estrutural adequado e contribua para a longevidade e resistência do pavimento rodoviário.

- **DNIT 113/2009-ME – (Pavimentação rodoviária - agregado artificial - avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria):** Estabelece os procedimentos para a avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria utilizada como agregado artificial em pavimentação rodoviária. Esta norma técnica é fundamental para garantir que a escória de aciaria empregada em obras viárias não cause problemas de durabilidade e estabilidade devido à expansão. A norma inclui os métodos de ensaio, critérios de aceitação, procedimentos de amostragem e os tratamentos recomendados. Essa especificação é crucial para assegurar a confiabilidade e segurança dos pavimentos rodoviários que utilizam agregados artificiais, garantindo que a expansão da escória de aciaria não comprometa a integridade estrutural das obras.

2.8- Utilização da escória de aciaria em camadas de base e sub-base de pavimentação flexível:

Segundo Santos (2013) e Silva, Barbosa e Silva (2021), diversos países, incluindo Brasil, Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, França, Alemanha, Itália, Japão e Coreia do Sul, têm adotado a escória siderúrgica como substituto aos agregados naturais como cascalho e areia em sub-bases e bases de pavimentação asfáltica. Estudos experimentais conduzidos por Izoton (2020) indicam que a incorporação de escória de aciaria em pavimentos asfálticos pode proporcionar desempenho equivalente ou superior ao dos agregados convencionais. No âmbito da pavimentação, a escória compete diretamente com materiais como areia e brita, sendo valorizada por suas propriedades como dureza, durabilidade e eficiência na tração (Silva, Barbosa e Silva, 2021). Além disso, conforme ressaltado por Resende (2010), sua alta resistência ao esmagamento representa um fator relevante tanto do ponto de vista técnico quanto econômico, possibilitando seu uso prolongado com mínima necessidade de manutenção. No Brasil, a utilização da escória em estruturas de pavimentação possui uma história significativa, com aplicação em trechos construídos há mais de duas décadas, como documentado por Rohde (2002).

3- Metodologia:

A pesquisa será exploratória e descritiva, utilizando métodos quantitativos para análise das propriedades físicas e mecânicas da escória de aciaria.

Sob o aspecto de sua natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada cujo objetivo é demonstrar a viabilidade de utilização do subproduto gerado na produção de aço, com o propósito de mitigar o problema de estocagem deste material, que acarreta elevados custos para as indústrias, além de contribuir para a redução da poluição visual.

Para a execução deste trabalho, foi necessário a realização de uma pesquisa bibliográfica na base de dados do Google Acadêmico, utilizando palavras-chave como escória, brita graduada simples, pavimentação e aciaria.

Será realizado um estudo de caso. Previamente será apresentada uma revisão sobre pavimentação rodoviária, escória de aciaria, e sua utilização como material de construção. As normas e estudos existentes, como as diretrizes do DNIT, serão consultados para embasar as análises.

O estudo de caso será realizada uma comparação entre a escória de aciaria e a brita graduada simples, a fim de verificar a viabilidade técnica e econômica da substituição da brita pela escória.

4- Estudo de caso:

A escória de aciaria foi coletada de siderúrgicas que utilizam fornos de arco elétrico e fornos básicos de oxigênio. As amostras serão caracterizadas quanto à composição química e propriedades físicas (granulometria, densidade). Será realizado um ensaio de caracterização comparativo com amostras de BGS.

Serão realizados levantamentos de custos de produção, transporte e aplicação da escória. Os dados econômicos incluirão:

- Custos diretos: (produção e transporte da escória, custos de pavimentação).
- Custos indiretos: (manutenção do pavimento ao longo do tempo, impactos ambientais evitados).

Os ensaios laboratoriais incluirão: Ensaio de Expansão para verificar o potencial expansivo da escória, especialmente relacionado à presença de óxidos de cálcio e magnésio e o ensaio de abrasão Los Angeles, é um procedimento padrão amplamente utilizado para medir a resistência dos agregados à fragmentação e à abrasão, que são fatores críticos na durabilidade de materiais.

Os resultados dos ensaios serão analisados para determinar a eficiência técnica da escória em relação ao BGS.

5- Análise de resultados técnicos:

Nesta seção, são apresentados e comparados os resultados dos ensaios realizados com a escória de aciaria fornecida pela Harsco Environmental com a normativa do BGS para uso como base em pavimentos. A comparação segue critérios técnicos normativos, destacando propriedades fundamentais para a aplicação desses materiais. Os parâmetros analisados incluem granulometria, índice de suporte Califórnia (ISC), resistência à abrasão "Los Angeles".

O objetivo é verificar o atendimento aos requisitos normativos apresentados no quadro 4, especialmente os ditados pela NBR 7181 e pelas especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), e entender as potencialidades da escória de aciaria como alternativa sustentável para a substituição parcial ou total da BGS.

A NBR 7181: **"Solo - Análise Granulométrica"**, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), estabelece os procedimentos para a determinação da distribuição granulométrica dos solos, incluindo materiais como agregados utilizados em pavimentação. A norma é amplamente aplicada para caracterizar os materiais que compõem camadas de base e sub-base em pavimentos rodoviários, incluindo a Brita Graduada Simples (BGS), garantindo que as faixas granulométricas estejam dentro dos limites necessários para o bom desempenho do pavimento.

No contexto deste trabalho, a NBR 7181 é usada como referência para a análise granulométrica da BGS e dos materiais alternativos, como a escória de aciaria, assegurando que esses agregados estejam de acordo com os requisitos técnicos adequados para a aplicação rodoviária.

Quadro 4: Requisitos BGS de acordo com NBR 7181

Propriedade	Valor Ideal	Observações
Granulometria (NBR 7181)	Passante Peneira #50 mm: 100%	O material deve ser bem graduado.
	Passante Peneira #25 mm: 85-100%	Graduação adequada para garantir boa compactação.
	Passante Peneira #9,5 mm: 40-70%	
	Passante Peneira #2 mm: 20-40%	
	Passante Peneira #0,425 mm: 5-20%	
	Passante Peneira #0,075 mm (filer): 2-8%	
Índice de Suporte Califórnia (ISC) (NBR 9895)	≥ 80%	O CBR alto garante resistência adequada para suportar o tráfego.
Compactação (NBR 7182)	Proctor Normal: 100%	Máxima compactação necessária para evitar recalques.
Massa específica aparente	≥ 2,0 g/cm³	Para garantir a densidade e a resistência da base.
Expansão máxima no ISC	≤ 0,5%	Controlar a expansão para evitar problemas de deformação.
Índice de vazios	12-20%	Proporção adequada de vazios para garantir a drenagem e evitar recalques.
Teor de umidade ótimo	5-8%	Para garantir a compactação adequada.
Resistência à compressão	≥ 2 MPa	Resiliência suficiente para suportar cargas.

Fonte: Adaptado pela autora da norma NBR7181

Cada propriedade apresentada acima possui valores ideais e observações para garantir a qualidade do material, como a boa graduação para a compactação e um ISC alto para resistência ao tráfego. Essas especificações visam assegurar a durabilidade e a capacidade do material em suportar cargas e evitar recalques em obras de infraestrutura.

O ensaio de expansão é realizado para avaliar o comportamento expansivo da escória, verificando a presença de componentes reativos que poderiam causar deformações ou falhas nos pavimentos. A amostra foi preparada, seca e submetida a condições controladas de umidade e temperatura, simulando as condições reais de aplicação. Ao longo do tempo, medições precisas foram feitas para identificar qualquer aumento de volume ou deformação na amostra, determinando a sua estabilidade e comportamento expansivo, como pode ser observado no quadro 5.

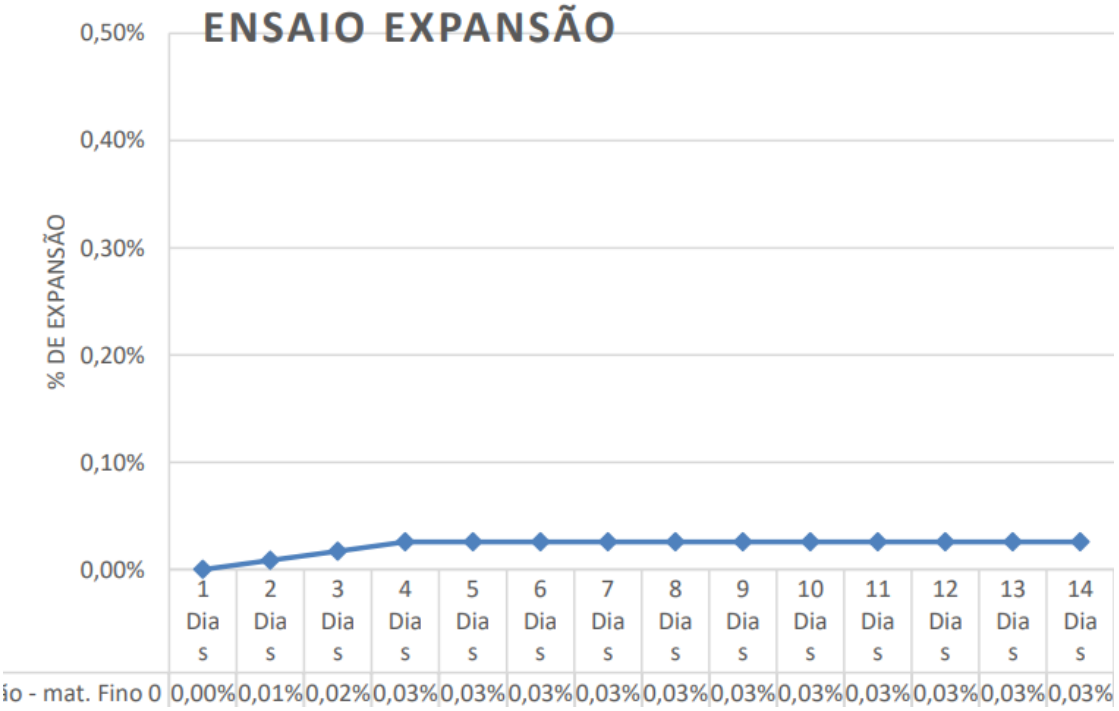
Quadro 5: Resultados obtidos no ensaio de expansão da escória

DATA	TEMPO	Dias	LEIT - CILINDRO 1	% de Expansão - mat. Fino 0
05/01/2022	0h	1	1,01	0,00%
06/01/2022	24h	2	1,02	0,01%
07/01/2022	48h	3	1,03	0,02%
08/01/2022	72h	4	1,04	0,03%
09/01/2022	96h	5	1,04	0,03%
10/01/2022	120h	6	1,04	0,03%
11/01/2022	144h	7	1,04	0,03%
12/01/2022	168h	8	1,04	0,03%
13/01/2022	192h	9	1,04	0,03%
14/01/2022	216h	10	1,04	0,03%
15/01/2022	240h	11	1,04	0,03%
16/01/2022	264h	12	1,04	0,03%
17/01/2022	288h	13	1,04	0,03%
18/01/2022	312h	14	1,04	0,03%
% de Expansão Volumétrica			0,03%	

Fonte: Relatório disponibilizado por Qualitech Engenharia (2022).

O quadro apresenta os resultados do ensaio de expansão realizado na escória, com medições em diferentes intervalos de tempo para avaliar seu comportamento expansivo. Os dados incluem leituras volumétricas (% de expansão) ao longo de um período de 312 horas (14 dias). Os valores indicam um leve aumento inicial no volume, estabilizando-se em torno de 0,03% após os primeiros dias, sugerindo uma baixa tendência expansiva da escória. Esse comportamento é relevante para garantir a estabilidade do material em aplicações de pavimentação, minimizando riscos de deformações e falhas estruturais. Apresenta-se abaixo a figura 9, como confirmação do quadro 5.

Figura 9: Gráfico referente ao ensaio de expansão



Fonte: Relatório disponibilizado por Qualitech Engenharia (2022).

Um dos principais pontos analisados foi a estabilidade volumétrica. A escória apresentou uma taxa de expansão praticamente nula (0,03%), o que a torna extremamente estável e adequada para evitar deformações no pavimento, atendendo aos requisitos da norma, que limita a expansão máxima em 0,5%. Este resultado é comparável ou até superior ao desempenho da BGS, que também deve apresentar expansão mínima para garantir a estabilidade estrutural (quadro 5).

A classificação granulométrica é fundamental para a escolha de materiais utilizados em pavimentação, uma vez que determina suas propriedades mecânicas e comportamentais. As faixas C e D, definidas pelo DNIT, atendem a diferentes aplicações no pavimento, variando em relação à granulometria, capacidade drenante e resistência. O quadro 6 apresenta uma comparação detalhada entre essas duas faixas, destacando suas principais características e usos.

Quadro 6: Faixas de graduação utilizadas nos ensaios

Critério	Faixa C	Faixa D
Descrição	Material mais graúdo, com menor quantidade de finos.	Material com maior presença de partículas finas (siltes e argilas).
Granulometria	Predomínio de agregados graúdos, menor proporção de partículas finas.	Permite maior proporção de partículas finas, respeitando limites normativos.
Capacidade Drenante	Boa capacidade de drenagem devido à granulometria mais aberta.	Menor capacidade drenante por conter mais partículas finas.
Resistência Mecânica	Alta resistência ao corte e à compactação, ideal para suportar cargas elevadas.	Resistência inferior à da faixa C, exigindo atenção especial na compactação.
Uso Principal	Camadas superiores, como sub-base e base, em pavimentos que demandam alta durabilidade.	Camadas inferiores, como reforço de subleito ou sub-base em condições menos exigentes.
Estabilidade	Elevada, com desempenho superior em cargas pesadas e tráfego intenso.	Menor estabilidade, adequada para cargas mais leves ou para camadas de suporte.
Problemas Potenciais	Segregação se não compactado adequadamente.	Plasticidade excessiva ou deformação, se não respeitadas as condições de aplicação.

Fonte: Adaptado pela autora do Manual de pavimentação – DNIT (2009).

No ensaio de abrasão "Los Angeles", foi avaliada a resistência ao desgaste dos agregados. Amostras de escória foram colocadas no tambor específico, juntamente com esferas de aço, e submetidas a rotações durante um número determinado de ciclos. Ao término do processo, os materiais foram retirados e passados por uma peneira padronizada. A massa do material retido foi comparada à massa inicial, permitindo o cálculo da perda de massa, que indicou a resistência dos agregados à abrasão. O ensaio foi essencial para entender o comportamento técnico dos materiais utilizados na pesquisa, pois revelou uma taxa de abrasão de 24,1% para a escória mais fina (figura 10) e de 18,2% para a escória média (figura 11). Esses valores estão dentro dos limites aceitáveis para materiais de pavimentação, sendo comparáveis à resistência exigida para a BGS (≤ 50%). Isso demonstra que a escória possui uma durabilidade adequada para resistir ao desgaste causado pelo tráfego pesado.

Figura 10: Resultados obtidos no ensaio de abrasão Los Angeles

DETERMINAÇÃO DA ABRASÃO "LOS ANGELES" - DNER-ME-035/98	
GRADUAÇÃO UTILIZADA:	C
Nº DE ROTAÇÕES DA MÁQUINA:	500
PESO INICIAL DA AMOSTRA (g):	5000,00
PESO DO MATERIAL RET. NA PENEIRA Nº 12 Após ensaio (g):	3796,80
ABRASÃO "LOS ANGELES" (%):	**24,1**

Fonte: Relatório disponibilizado por Qualitech Engenharia. (2022)

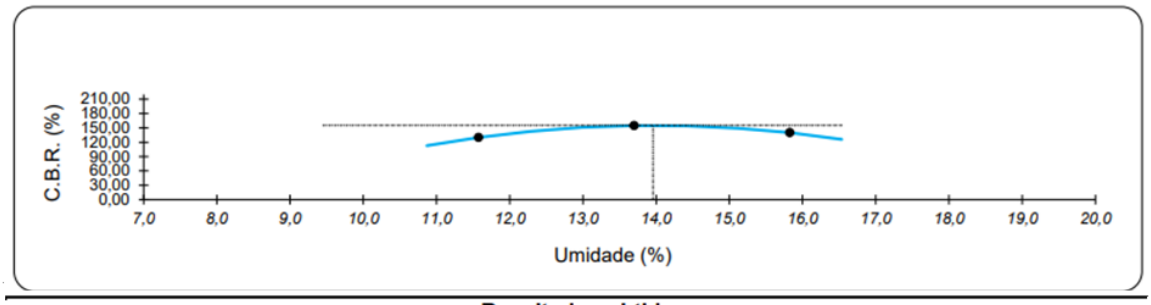
Figura 11: Resultados obtidos no ensaio de abrasão Los Angeles

DETERMINAÇÃO DA ABRASÃO "LOS ANGELES" - DNER-ME-035/98	
GRADUAÇÃO UTILIZADA:	B
Nº DE ROTAÇÕES DA MÁQUINA:	500
PESO INICIAL DA AMOSTRA (g):	5000,00
PESO DO MATERIAL RET. NA PENEIRA Nº 12 Após ensaio (g):	4092,40
ABRASÃO "LOS ANGELES" (%):	**18,2**

Fonte: Relatório disponibilizado por Qualitech Engenharia. (2022)

Para o índice suporte Califórnia, a figura 12 mostra que a escória apresentou o resultado de 155,1%, um valor significativamente superior ao mínimo exigido pela norma (≥ 80% para a BGS). Este resultado indica que a escória tem uma excelente capacidade de suporte e resistência, o que a torna um material viável para a utilização em bases e sub-bases de pavimentos, superando até mesmo o desempenho típico da BGS.

Figura 12: Resultado obtidos para ISC



Resultados obtidos

> Hot[1]	14,0	%	> I.S.C[3]	155,1	%
> Dmax[2]	2,421	g/cm³	> Exp.	0	%

1 - Umidade ótima, 2 - Massa específica aparente máxima, 3 - Índice de Suporte Califórnia C.B.R

Fonte: Relatório disponibilizado por Qualitech Engenharia. (2022)

Portanto, os resultados dos ensaios indicam que a escória de aciaria possui características físicas e mecânicas comparáveis, e em alguns casos superiores, às da BGS, particularmente no que diz respeito à estabilidade volumétrica e à resistência mecânica. Isso confirma sua viabilidade técnica como substituto parcial em pavimentações, atendendo aos padrões estabelecidos pelas normas, de acordo com os dados apresentados a seguir no quadro 7.

Quadro 7: Comparativo entre BGS X Escória de Aciaria

Propriedade	BGS (Padrões Ideais)	Escória de Aciaria (Harsco)
Índice de Suporte Califórnia (ISC)	≥ 80%	155,1%
Expansão Volumétrica	≤ 0,5%	0,03%
Resistência à Abrasão (Los Angeles)	≤ 50% de perda de massa	Abrasão fina: 24,1%
		Abrasão média: 18,2%

Fonte: Elaborado pela autora.

O quadro evidencia que a escória de aciaria apresenta desempenho superior à Brita Graduada Simples (BGS) nas três propriedades comparadas. O Índice de Suporte Califórnia (ISC) da escória, com 155,1%, excede em quase o dobro o valor mínimo exigido para a BGS, que é de 80%, indicando uma maior capacidade de suporte à carga e resistência ao tráfego pesado. No que se refere à expansão volumétrica, a escória demonstrou excelente estabilidade dimensional, com um valor de 0,03%, muito inferior ao limite máximo de 0,5% estabelecido para a BGS, o que minimiza o risco de deformações e recalques no pavimento. Além disso, a resistência à abrasão, medida pelo ensaio "Los Angeles", revelou perdas de massa de 24,1% para partículas finas e 18,2% para partículas médias, ambas bem abaixo do limite de 50%, conferindo à escória uma maior durabilidade e resistência ao desgaste. Esses resultados apontam para a escória de aciaria como uma alternativa técnica robusta e eficaz para aplicação em bases de pavimentos rodoviários, tanto do ponto de vista mecânico quanto em termos de estabilidade estrutural.

6 – Análise de resultados econômicos:

A viabilidade econômica é um dos principais aspectos a destacar sobre o uso da escória de aciaria. Conforme mencionado ao longo deste trabalho, a escória é um subproduto do processo de produção de aço. Como as grandes siderúrgicas geralmente não reaproveitam todo o material produzido, ele é, em muitos casos, disponibilizado gratuitamente.

Em Juiz de Fora, a siderúrgica local realiza a doação da escória mediante cadastro e assinatura de um termo de doação. Dessa forma, o único custo inicial para as empresas locais é o do transporte. No entanto, após a retirada do material, é necessário realizar seu tratamento, o que acarreta alguns custos adicionais. Este

processo de tratamento inclui um período de cura de aproximadamente seis meses, o que exige um espaço adequado para estocagem. Assim, o custo com terreno e a preparação da escória precisam ser considerados, conforme apresentado no quadro 3.

7- Conclusão:

A análise da viabilidade técnica e econômica da escória de aciaria evidenciam seu potencial como uma solução sustentável e eficiente para a pavimentação, especialmente como substituta da brita graduada simples. Os ensaios laboratoriais realizados e as normas técnicas aplicáveis, como as diretrizes do DNIT, demonstram que a escória possui características estruturais e de durabilidade compatíveis com as exigências das camadas de pavimento.

A sua capacidade de atender aos parâmetros de resistência mecânica e estabilidade ao longo do tempo reforça sua aptidão para este tipo de aplicação, um aspecto técnico relevante é o controle do potencial expansivo da escória, que pode ser mitigado de forma significativa por meio de tratamento específicos, como a cura ao tempo, a vapor ou em autoclave. Essas técnicas não apenas melhoram as propriedades do material, mas também garantem a segurança e a durabilidade da estrutura rodoviária.

Do ponto de vista econômico, a utilização da escória de aciaria apresenta-se como uma alternativa atrativa, considerando que ela é um subproduto da indústria siderúrgica e, portanto, por hora não existem custos diretos para a sua aquisição. O principal investimento necessário está relacionado ao transporte, à estocagem e à execução do processo de cura, mas esses custos são amplamente compensados pela eliminação da necessidade de exploração e aquisição de agregados naturais.

Em regiões próximas às siderúrgicas, como Juiz de Fora, essa logística torna-se ainda mais vantajosa, reduzindo ainda mais as despesas de transporte e promovendo uma cadeia produtiva mais sustentável.

Além dos aspectos técnicos e econômicos, o uso da escória de aciaria promove importantes benefícios ambientais. Ao transformar um resíduo industrial em um insumo útil para a construção civil, contribuindo também para a redução de passivos ambientais associados ao descarte inadequado do material. Paralelamente, minimiza-se a exploração de recursos naturais, como rochas e minerais, promovendo a preservação ambiental e alinhando-se às diretrizes de desenvolvimento sustentável.

Dessa forma, o estudo reforça que a escória de aciaria é um material estratégico para a construção civil, combinando sustentabilidade ambiental, viabilidade econômica e

desempenho técnico satisfatório. Sua aplicação em pavimentação rodoviária representa uma oportunidade para inovar no setor, reduzindo custos, melhorando a eficiência das obras e promovendo uma economia mais circular. Assim, conclui-se que a escória de aciaria não apenas atende aos requisitos técnicos e normativos, mas também contribui significativamente para um modelo de construção mais sustentável e consciente, com benefícios diretos para as indústrias, para o meio ambiente e para a sociedade.

8- Referências:

1. AÇO BRASIL. Estatística da Siderurgia - 4º trimestre de 2023. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2024/04/Estatistica-da-Siderurgia_4o_TRI_2023. Acesso em: 19 de maio de 2024.
2. ABNT-Catálogo de Normas. Disponível em: https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?ID=358011. Acesso em: 19 de maio de 2024.
3. BRASIL, 2006. Norma DNIT 031/2006 - ES: Especificação de Serviço. 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_031_2006_es.pdf. Acesso em: 19 de maio de 2024.
4. BRASIL, 2014. Norma DNIT 169/2014 - ES: Especificação de Serviço. 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_169_2014_es.pdf. Acesso em: 14 de maio de 2024.
5. BRASIL, 2016. Norma Brasileira ABNT 9895 – 2° ed. SOLO – ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA – MÉTODO DE ENSAIO. Disponível em: https://doku.pub/documents/nbr-9895-2016-indice-de-suporte-californiapdf-4qzdx8dopxlk. Acesso em: 6 jun. 2024.
6. CARLUC. Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Disponível em: https://carluc.com.br/materiais/concreto-betuminoso-usinado-a-quente-cbuq/#:~:text=O%20Concreto%20Betuminoso%20Usinado%20a,nivelado%20e%20resistente%20ao%20elemento. Acesso em: 14 maio 2024.
7. CRUZ, D. Pavimentação rodoviária. Disponível em: https://www.linkedin.com/pulse/pavimenta%C3%A7%C3%A3o-rodovi%C3%A1ria-david-cruz/. Acesso em: 2 jun. 2024.
8. Profª Drª Maristela Gomes da Silva. SlidePlayer, 2014. Disponível em: https://slideplayer.com.br/slide/1739705/#google_vignette. Acesso em: 19 de maio de 2024.
9. ESTUDE ENGENHARIA. Ensaio de Proctor – Compactação de Solos. Disponível em: https://estudeengenharia.com/ensaio-de-proctor-compactacao-de-solos/. Acesso em: 6 jun. 2024.
10. IDOC.PUB. Documentação de Compactação. Disponível em: https://idoc.pub/documents/idocpub-d49oxe5gy049#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Fidoc.pub%2Fdocuments%2Fidocpub,100. Acesso em: 6 jun. 2024.
11. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Serviços: Transportes - Anuário 2023. Disponível em: https://anuario.ibge.gov.br/2023/servicos/transportes.html. Acesso em: 20 nov. 2024.

12. LAReX - Laboratório de Reciclagem de Resíduos Industriais**.** Reciclagem da escória de aciaria. Disponível em: http://larex.poli.usp.br/reciclagem-da-escoria-de-aciaria/#:~:text=Portanto%2C%20o%20reaproveitamento%20da%20esc%C3%B3ria,produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20fibras%20de%20vidro. Acesso em: 16 abr. 2024.
13. LIMA, Dalila Lima. Estudo de manutenção e reabilitação de pavimentação asfáltica – Para um condomínio vertical na cidade de Anápolis. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 43p. 2019.
14. Manual de pavimentação. 3.ed. – Rio de Janeiro, RJ, 274p. 2006.
15. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros / Liedi Bariani Bernucci... [et al.]. – Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2ª edição, 2022. 750 p.: il.
16. SLIDEPLAYER. Documentação de pavimentação. Disponível em: https://slideplayer.com.br/slide/1739705/#google_vignette. Acesso em: 17 jun. 2024.
17. SUPORTE SOLOS. Determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR) - Ensaio Geotécnico. Disponível em: https://www.suportesolos.com.br/blog/determinacao-do-indice-de-suporte-california-cbr-ensaio-geotecnico-norma-abnt-9895/127/. Acesso em: 6 jun. 2024.
18. TODA MATÉRIA. Transportes no Brasil. Disponível em: https://www.todamateria.com.br/transportes-no-brasil/#:~:text=Entretanto%2C%20o%20transporte%20mais%20utilizado,%C3%B4nibus%2C%20caminh%C3%A3o%2C%20dentre%20outros. Acesso em: 1 maio 2024.
19. YOUTUBE. Pavimentação rodoviária. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=MPM5rfHjxOo. Acesso em: 19 maio 2024.