

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD PARA CAMADA DE REVESTIMENTO PRIMÁRIO EM ESTRADAS: UM CASO EM MANGARAÍ – ES

1 INTRODUÇÃO

A economia global tem adotado predominantemente um modelo linear de produção e consumo, em que os produtos são fabricados, utilizados e depois descartados como resíduos. Esse modelo tem causado perdas significativas e aumentado a demanda por matérias-primas, agravada pelo rápido crescimento das economias consumistas desde o século XX. Em resposta, o conceito de economia circular surge como uma alternativa promissora, buscando sistemas econômicos mais sustentáveis ao reduzir o uso de recursos finitos e promover a reutilização de materiais.

Com a crise econômica e a redução dos investimentos no setor rodoviário, a busca por materiais alternativos sustentáveis e economicamente viáveis torna-se essencial. O uso de coprodutos siderúrgicos, entre os quais se destaca a escória de aciaria, representa uma solução potencial para substituir agregados naturais em pavimentos, oferecendo uma alternativa técnica e econômica adequada. A pavimentação de estradas vicinais não só contribui para a conservação das vias e para a redução dos custos de manutenção, mas também gera ganhos econômicos, sociais e de saúde pública. Estradas bem conservadas melhoram o acesso a serviços essenciais, fomentam o desenvolvimento econômico local e reduzem a emissão de poeira e a ocorrência de acidentes.

Nesse cenário, o Departamento de Edificações e Rodovias do Espírito Santo (DER/ES) desenvolveu o projeto Mangaraí com o objetivo de reabilitar 53 km de estradas vicinais em Santa Leopoldina. As estradas na bacia do Rio Mangaraí encontravam-se em condições precárias, o que dificultava o escoamento agrícola e o acesso a serviços essenciais de saúde e educação, além de prejudicar o agroturismo. A ausência de drenagem adequada agravava esses problemas, levando ao assoreamento e acúmulo de sedimentos nos cursos d'água. O projeto representa uma oportunidade para o uso da escória de aciaria como material para camada de revestimento primário destas estradas. No Espírito Santo, a escória de aciaria do tipo LD (Linz Donawitz) produzida pela ArcelorMittal Tubarão é beneficiada e disponibilizada comercialmente com o nome de REVSOL®.

Nesse contexto, o REVSOL® surge como uma solução promissora para reduzir custos e promover a sustentabilidade na pavimentação, ao transformar um resíduo industrial em um insumo. O objetivo da pesquisa é avaliar não apenas a viabilidade técnica do REVSOL®, mas também contribuir para a formulação de uma normativa estadual que permita sua utilização em pavimentos, ampliando as opções de materiais sustentáveis no setor rodoviário.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial técnico do REVSOL® como agregado graúdo para aplicação em pavimentação do tipo revestimento primário.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre as características do REVSOL® e, complementarmente, sobre a escória de aciaria LD, além dos usos em pavimentação de vias.

- Desenvolver um programa experimental com diferentes dosagens de REVSOL® e solo, visando identificar uma mistura otimizada do ponto de vista técnico para aplicação como camada de pavimento do tipo revestimento primário, em uma área de estudo do Projeto Mangaraí, localizado no município de Santa Leopoldina/ES.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular surge como uma resposta às crescentes preocupações ambientais e ao esgotamento de recursos naturais, oferecendo uma alternativa ao modelo linear de produção e consumo, que culmina em desperdício e passivos ambientais. Ao contrário da economia linear, que extrai, consome e descarta matérias-primas, a economia circular foca na reutilização, redução e reciclagem de materiais, princípio dos "3R".

O conceito de economia circular, proposto por Pearce e Turner em 1990, visa fechar o ciclo econômico e ambiental, reduzindo a poluição e mantendo materiais em uso pelo maior tempo possível. A Ellen MacArthur Foundation (EMF, 2017) detalha um sistema de economia circular que integra a gestão de bens renováveis e prolonga a vida útil dos produtos, enfatizando a necessidade de políticas públicas, investimentos e inovação para a implementação eficaz dessa abordagem. No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos e outras iniciativas estão em andamento para promover uma economia mais sustentável, embora ainda haja desafios na integração e efetiva aplicação desses princípios.

A adesão à economia circular é crescente globalmente, com a Europa liderando através de legislações e incentivos (Teixeira et al., 2022). No Brasil, iniciativas como o Projeto de Lei 1874/2022 e a pesquisa da CNI (Conselho Nacional da Indústria, 2020) sobre a adoção de práticas circulares nas indústrias mostram um avanço, mas também destacam barreiras como o custo inicial e a complexidade da cadeia produtiva. Organizações como a World Steel Association também contribuem para essa transição, promovendo práticas sustentáveis e circulares no setor siderúrgico. É fundamental que governos, empresas e consumidores colaborem para transformar a economia e alcançar um desenvolvimento sustentável.

3.2 PAVIMENTAÇÃO E REVESTIMENTO PRIMÁRIO

Historicamente, o transporte rodoviário no Brasil desempenha um papel crucial na economia, abrangendo quase todo o território nacional. No entanto, a infraestrutura rodoviária do país está aquém das necessidades, com apenas 21,4% das rodovias pavimentadas e bem mantidas, segundo o Sistema Nacional de Viação (Brasil, 2016). Dados mais recentes da CNT (Confederação Nacional do Transporte, 2023) confirmam que 78,5% das rodovias ainda carecem de pavimentação adequada, refletindo uma situação crítica e negligenciada que afeta o desenvolvimento socioeconômico, especialmente em áreas rurais.

As estradas não pavimentadas, ou estradas vicinais, são fundamentais para conectar áreas urbanas e rurais e têm um papel vital na acessibilidade e no desenvolvimento regional. Para essas vias, o revestimento primário é uma alternativa econômica e prática, constituído por camadas de solo e materiais granulares, que garante tráfego adequado mesmo em condições climáticas adversas. Este revestimento é regulamentado pelas normas DNIT 445/2023 e DER/PR ES-T 07/18, especificando requisitos como a composição do material e as propriedades técnicas necessárias.

3.3 ESCÓRIA DE ACIARIA

Os rejeitos siderúrgicos são subprodutos do processo de beneficiamento do aço, dentre os quais se destacam a escória de alto-forno e a escória de aciaria. Em média, para cada tonelada de aço produzida no mundo, entre 200 e 400 kg de coprodutos são gerados, sendo a escória o resíduo mais significativo, representando mais de 60% dos resíduos gerados (Geyer, 2001 apud Branco, 2004). A escória de alto-forno resulta da fusão de minérios no alto-forno e é rica em carbono e impurezas, enquanto a escória de aciaria é produzida durante a transformação de sucata em aço em fornos elétricos e conversores.

Durante a produção de aço, elementos como carbono e silício são removidos e acabam na escória, que contém compostos como silicatos de cálcio e óxidos diversos. As escórias são então transformadas em agregados siderúrgicos, categorizados como agregado bruto, graduado de alto-forno ou graduado de aciaria, dependendo de sua origem. A composição e propriedades da escória variam com o tipo de forno, o processo de refino e o método de resfriamento, que pode ser feito ao ar, rapidamente com vapor ou abruptamente com jato d'água.

Para ser utilizada na pavimentação, a escória deve atender a critérios específicos estabelecidos por normas, como limites de expansão, granulometria, e resistência ao desgaste e à durabilidade. No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) especifica as características para garantir a adequação da escória em pavimentos rodoviários. A escória deve ser isenta de impurezas e ter uma granulometria adequada, além de apresentar resistência a abrasão e expansão.

No estado do Espírito Santo foi desenvolvido pela ArcelorMittal Tubarão um coproduto denominado REVSOL®, a partir da escória de aciaria LD. Sua criação envolveu diversos experimentos para ajustar sua formulação, sendo a mistura mais recomendada com argila a proporção três partes de REVSOL® para uma de argila, e é aplicada em pavimentos como revestimento primário.

Internacionalmente, a escória é amplamente utilizada em pavimentação. Na França, por exemplo, a escória é misturada com agregados comuns ou cal hidratada para a construção de bases e sub-bases de rodovias, sendo aplicada em cerca de 65% das rodovias francesas. Na África do Sul, é comum a mistura de escória com cal para pavimentos. Essas práticas mostram a aplicação eficiente de escória como material de construção e a necessidade de regulamentação adequada para seu uso em diferentes contextos.

4 METODOLOGIA

4.1 ÁREA DE ESTUDO – PROJETO MANGARAÍ

A área de estudo do Projeto Mangaraí está situada na sub-bacia do Rio Mangaraí, em Santa Leopoldina, e enfrenta sérios problemas de assoreamento devido à erosão do solo que resulta em depósitos de material geológico no leito do rio. A geologia e topografia da região, que inclui um relevo acidentado, contribuem para essa erosão, exacerbada pela atividade humana, como terraplenagens e práticas agrícolas que expõem o solo.

As estradas na região têm intensificado esses problemas ambientais, funcionando como valetas que direcionam as águas das chuvas de maneira inadequada, acelerando a erosão dos pavimentos e taludes. O Projeto Mangaraí visa solucionar essas questões através da pavimentação de aproximadamente 53 km de estradas vicinais e da implementação de sistemas de drenagem, como caixas secas e bacias de sedimentação, para reduzir o carreamento de sedimentos e melhorar a qualidade da água na bacia do Rio Mangaraí.

4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O planejamento experimental incluiu a seleção e revisão de materiais, a coleta de amostras e a realização dos ensaios tecnológicos. O programa experimental foi desenvolvido no Laboratório de Solos, Asfalto e Concreto do Departamento de Edificações e Rodovias do ES, em Vila Velha/ES. Foram preparadas misturas de solo com REVSOL® e solo com BGS, nas proporções 50% de agregado e 50% de solo, 70% de agregado e 30% de solo, e 80% de agregado e 20% de solo, com base em proporções estabelecidas por pesquisas prévias

A amostra de solo foi obtida de um talude na estrada vicinal da bacia do Mangaraí, em Santa Leopoldina/ES. O REVSOL® foi coletado do pátio da ArcelorMittal Tubarão, em Serra/ES, e a BGS foi retirada da Mineradora Brasitália, em Cariacica/ES.

Os testes seguiram a norma de referência para revestimento primário DER/PR ES-T 07/18, a capacidade suporte dos materiais usando o Índice de Suporte Califórnia (ISC) e os índices de consistência (LL e LP). Para assegurar a equivalência na distribuição granulométrica, a curva granulométrica do BGS foi ajustada para coincidir com a do REVSOL®, utilizando uma mistura de brita 1, brita 0 e pó de pedra para atender à norma DNIT 141/2010-ES.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E GEOTÉCNICA

As análises granulométricas do REVSOL®, BGS e das misturas estabilizadas foram realizadas conforme as normas DNER-ME 083/98 para agregados e DNER-ME 080/94 para solos. A amostra de solo estudada apresentou 45,90% de silte e argila, superando o limite recomendado de 35% para revestimento primário pela norma DER/PR ES-T 07/18. Para ajustar esse parâmetro, optou-se pela estabilização mecânica do solo por meio da mistura com REVSOL® e BGS, seguindo a metodologia de Bernucci *et al.* (2006).

O REVSOL® e a BGS atenderam à faixa C do DNIT 141/2010-ES, indicando um bom controle granulométrico na produção desses materiais. De acordo com a classificação do Transportation Research Board (TRB), o solo foi classificado como Grupo A-6 (solo argiloso), enquanto REVSOL® e BGS pertencem ao Grupo A-1-B (fragmentos de rochas e pedregulhos).

As análises granulométricas das misturas de REVSOL® e solo, bem como de BGS e solo, mostraram comportamentos semelhantes, conforme esperado, devido ao perfil granulométrico da BGS ajustada à faixa C para esta pesquisa. As misturas nas proporções 20/80% e 30/70% (solo/REVSOL® ou solo/BGS) se enquadraram na faixa D da norma DNIT 141/2010-ES, indicando conformidade com os requisitos para bases estabilizadas granulometricamente. No entanto, a mistura 50/50% não atendeu completamente aos limites da faixa D. É importante notar que essa avaliação é somente comparativa pois é parâmetro para bases de pavimentos flexíveis.

À medida que a quantidade de solo nas misturas foi reduzida e substituída por REVSOL® ou BGS, o percentual de grãos passantes na abertura de 0,075 mm diminuiu, como esperado. Todas as proporções de misturas atenderam às recomendações para revestimento primário segundo a norma DER/PR ES-T 07/18.

A pesquisa revelou que, ao reduzir os teores de solo e aumentar a proporção de REVSOL® ou BGS nas misturas, os limites de liquidez diminuíram. Observou-se que as misturas com REVSOL® apresentaram limites de liquidez ligeiramente superiores às com BGS, o que pode ser atribuído à textura mais áspera e angular dos grãos de REVSOL® e à maior porosidade deste material, que demanda mais água para lubrificação.

Quanto ao limite de plasticidade, a redução dos teores de solo nas misturas não afetou significativamente seus valores, com diferenças entre as misturas com REVSOL® e BGS sendo inferiores a $\pm 1\%$. A presença de mica na BGS pode contribuir para uma coesão mais efetiva, enquanto os grãos de REVSOL® tendem a criar uma coesão aparente ou falsa coesão. Todas

as misturas atenderam às recomendações da norma DER/PR ES-T 07/18 para limite de liquidez (inferior a 40%) e índice de plasticidade (inferior a 10%).

A redução dos teores de solo e o aumento de REVSOL® ou BGS levaram a uma diminuição da umidade ótima, sendo a BGS mais influente do que o REVSOL®. A massa específica aparente seca máxima foi maior para o REVSOL® comparado ao solo e à BGS, o que pode ser explicado pela maior massa específica real do REVSOL®. Embora valores específicos de densidade e porosidade não tenham sido medidos, a literatura indica que a escória de aciaria possui densidade superior à da BGS granítica. Todos os materiais e misturas apresentaram expansão próxima de zero.

5.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Os resultados encontrados nos ensaios para determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR) foram realizados na energia de compactação Proctor Intermediário, em que o REVSOL® e a BGS apresentaram CBR de 127% e 89,7% respectivamente, superior ao solo, que apresentou 32%. Pôde-se atestar que todos os materiais e misturas, com exceção da BGS e da mistura Solo/BGS-20/80%, apresentaram valores máximos de CBR no ramo seco e expansão dentro dos limites estabelecidos pelas principais normas técnicas. Isto resultou na obtenção de maiores valores de CBR com menor quantidade de água estando no ramo seco.

Também foi constatado que, tomando como referência o CBR da BGS e do REVSOL®, as misturas de solo com BGS provocaram uma redução do seu CBR, ao passo que o REVSOL® parece manter o seu valor de referência. Ou seja, a incorporação do solo nas misturas com BGS apresenta redução maiores do CBR do que o REVSOL®, que apresentou pequena variação para mais ou para menos.

O aumento do CBR do solo com a incorporação do REVSOL®, pode ser explicado pelo maior atrito entre os grãos e pela distribuição granulométrica (Faixa C). Apesar de não estar previsto nesta pesquisa a composição química dos materiais, sabe-se que o REVSOL®, por se tratar de uma escória de aciaria LD, apresenta valores significativos de óxido de cálcio livre, hidróxido de cálcio (cal) e carbonato de cálcio, que reagem com os minerais argílicos. A presença destes compostos provoca um aumento na floculação das partículas de argila. Como consequência, ocorre um aumento da capacidade de suporte, e uma redução da expansão e da plasticidade.

Entretanto, essas reações pozolânicas podem ser lentas e características do solo, temperatura ambiente, teores de hidróxido de cálcio, mineralogia do solo, são alguns dos fatores influenciadores (Maubec et al., 2017). A significância desta influência não pôde ser avaliada a partir dos resultados e da metodologia adotada nesta pesquisa.

Observou-se que, com relação ao CBR, todos os materiais e misturas atenderam ao limite mínimo de 20%. Quanto ao índice de plasticidade, foi verificado que somente o índice de plasticidade - IP do solo (11,00%) não atendeu ao limite máximo especificado pela norma utilizada como diretriz neste estudo. Esta característica geotécnica do solo pode ser considerada como um limitador para o aumento da porcentagem da argila estudada (disponível no local) à mistura, ação que reduziria os custos com aquisição e transporte do BGS ou REVSOL®.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os resultados dos ensaios realizados para a caracterização física, geotécnica e mecânica dos materiais (BGS, REVSOL® e solo local) e das misturas Solo/REVSOL® nas proporções 50/50%, 30/70% e 20/80%, pode-se afirmar que o agregado siderúrgico REVSOL® se apresenta como uma alternativa viável, do ponto de vista técnico,

em substituição ao agregado graúdo natural em pavimentos do tipo revestimento primário, considerando parâmetros técnicos preconizados pela norma DER/PR ES-T 07/18. Sendo assim, para a definição de mistura ótima deverá ser observado outros fatores complementares para uma tomada de decisão, sobretudo a viabilidade econômica.

No que se refere à viabilidade ambiental da utilização do REVSOL® para este estudo, esse coproduto siderúrgico tem potencial para ser utilizado em substituição ao agregado graúdo natural, tendo em vista a sua classificação ambiental Classe II-B (inerte), segundo a Ficha de Informação de Segurança para Produtos Químicos – FISPQ do REVSOL® da ArcelorMittal.

Assim, este estudo demonstrou que este resíduo industrial, transformado em um novo material útil, possui alto potencial de reutilização e reciclagem, alinhado com os princípios da economia circular e do desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. 1. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, 2006.

BRANCO, T. F. C. *Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado*. 2004. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. *Sistema Nacional de Viação, 2016*. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/sistema-nacional-de-viacao/sistema-nacional-de-viacao>. Acesso em: 27 ago. 2024.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. *Pesquisa CNT de rodovias em 2023*. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2023. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/pesquisa-cnt-de-rodovias-2023-refora-a-importancia-de-maior-investimento-na-malha-rodoviria>. Acesso em: 01 jun. 2024.

CONSELHO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI. *Avaliação da prática da economia circular nas indústrias brasileiras*. 2020. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/cni/canais/industria-sustentavel/temas-de-atuacao/economia-circular/>. Acesso em: 02 jun. 2024.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION – EMF. *Uma economia circular no Brasil: uma abordagem exploratória inicial*. 2017. Disponível em: https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/Uma-Economia-Circular-no-Brasil_Uma-Exploracao-Inicial.pdf. Acesso em: 11 mai. 2024.

MAUBEC, N.; DENELE, D.; OUVARD, G. Influence of the clay type on the strength evolution of lime treated material. *Applied Clay Science*, v. 137, p. 107–114, 2017.

PEARCE, D. W.; TURNER, R. K. *Economics of Natural Resources and the Environment*. Hemel Hempstead: Harvester Wheatsheaf, 1990. 398 p.

TEIXEIRA, C. H. S. B.; TEIXEIRA, R. L. P.; VEIGA, R. T.; BRITO, M. L. A.; SILVA, P. C. D. The circular economy in the age of the 4th industrial revolution: the use of technology towards transition. *Revista Gestão & Tecnologia*, v. 22, n. 4, p. 64-89, 2022.