

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
COLEGIADO DE ENGENHARIA CIVIL

LUCAS ABREU PAIVA

ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS NA CONSTRUÇÃO DE PAVIMENTOS EM
BLOCO INTERTRAVADO DE CONCRETO COM E SEM
USO DE RESÍDUO DE SIDERURGIA

VITÓRIA

2025

LUCAS ABREU PAIVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS NA CONSTRUÇÃO DE PAVIMENTOS
EM BLOCO INTERTRAVADO DE CONCRETO COM E SEM
USO DE RESÍDUO DE SIDERURGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Civil do Cen-
tro Tecnológico da Universidade Federal do
Espírito Santo, como requisito parcial para
obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador(a):

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires

Vitória, ES

2025

ATA DE DEFESA DO PROJETO DE GRADUAÇÃO

**Título: ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS NA CONSTRUÇÃO DE PAVIMENTOS
EM BLOCO INTERTRAVADO DE CONCRETO COM E SEM
USO DE RESÍDUO DE SIDERURGIA**

Aluno (s): **LUCAS ABREU PAIVA**

Orientador: Prof. Patrício José Moreira Pires

Data da defesa: 25/03/2025

Local: Link da videochamada: <https://meet.google.com/www-cjip-odv>

Critérios para avaliação:	Nota:
Apresentação oral	10,00
Monografia (apresentação escrita)	10,00
Conhecimento técnico	10,00
Média Final	10,00

Banca Examinadora

Nome:

Assinatura

1. Prof. Patrício José Moreira Pires, DSc

2. Prof. Ronaldo Pilar, DSc

3. Eng. Sidineidy Izoton, MSc

Presidente da Seção:

Prof. Patrício José Moreira Pires

Assinatura:

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise comparativa de custos na construção de pavimentos intertravados de concreto, com e sem o uso de resíduos de siderurgia, a fim de avaliar a viabilidade econômica e técnica dessa solução alternativa. O estudo foi conduzido a partir da obra do programa “Caminhos do Campo”, localizada na Rota do Carmo, Espírito Santo, onde blocos intertravados de concreto foram empregados na pavimentação.

A pesquisa compara diferentes cenários de pavimentação, analisando o impacto financeiro e ambiental da substituição parcial de materiais naturais por resíduos siderúrgicos, como o Revsol e a escória de alto forno. Para a comparação foram avaliados parâmetros como custo de execução, vida útil do pavimento e impacto ambiental associado, destacando-se os benefícios da economia circular e da sustentabilidade na engenharia civil.

Os resultados indicaram que o uso do resíduo siderúrgico pode representar uma redução significativa nos custos da obra sem comprometer a qualidade do pavimento. Além disso, a adoção desse material pode contribuir para minimizar impactos ambientais, reduzindo a exploração de recursos naturais e promovendo práticas mais sustentáveis na construção de infraestrutura viária.

Palavras-chave: Orçamento, Revsol, Pavimentação, Escória, Pavimentos intertravados.

*Aos meus pais, meu irmão Filipe e à minha
namorada Isadora. Obrigado por todo o apoio
e confiança até aqui, sem vocês nada seria
possível.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maurício e Cristina, por todo apoio e amor durante esses anos. Obrigado por sempre terem me motivado a seguir meus sonhos e feito de tudo para me ajudar a trilhar esse caminho.

À Isadora, meu grande Amor, que sempre esteve ao meu lado nos bons e maus momentos, me motivando a nunca desistir. Obrigado por ser meu exemplo de dedicação e compromisso, e por sempre estar comigo durante esse período tão importante que é a faculdade, me fazendo feliz todos os dias.

Ao meu irmão Filipe, que sempre foi meu exemplo de pessoa e profissional que quero seguir. Obrigado por, além de ser meu irmão, ser o meu melhor amigo. Te agradeço por sempre me ajudar em todas as decisões difíceis e me dar os melhores conselhos.

Aos meus amigos Rodrigo e Lennon, que sempre me deram apoio e escutaram todos os problemas que eu tinha para desabafar. Obrigado por todas as noites de diversão e jogatina que são tão importantes nesse momento turbulento que é a faculdade.

Ao meu amigo Kaio, que esteve ao meu lado desde o início da faculdade. Obrigado por ser alguém com quem sempre pude contar e por sempre estar comigo em todas as etapas dessa jornada.

Ao meu grupo de amigos, Tiago, Enzo, João, Rhulian, Lucas, Caio, Guilherme e Matheus por terem me proporcionado grandes memórias durante esse período. Obrigado por sempre estarem comigo em todos esses momentos de diversão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Trecho previsto para trabalhos de pavimentação “Rota do Carmo”	2
Figura 2: Processo de produção do aço	5
Figura 3: Interior alto forno.	10
Figura 4: Resfriamento da escória ao ar	11
Figura 5: Resfriamento rápido da escória.....	11
Figura 6: Escória de aciaria LD peneirada	13
Figura 7: Depósito de RevSol em Rota do Carmo	14
Figura 8: Diagrama para espessura de sub-base.	16
Figura 9: Diagrama para espessura de base.....	16
Figura 10: Espessura da base granular	18
Figura 11: Esquema de seção transversal de um pavimento	19
Figura 12: Execução de regularização de subleito	19
Figura 13: Execução de camada de base	21
Figura 14: Revestimento primário com agregados naturais	22
Figura 15: Execução de pavimento intertravado de concreto.....	23
Figura 16: Tipos de arranjos	24
Figura 17: Seção transversal Pavimento: Bloco Intertravado	25
Figura 18: Transporte do bloco intertravado de concreto.....	28
Figura 19: Escavação e carga de material de jazida	32
Figura 20: Dados de produção do bloco	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produção de aço bruto no Brasil até o segundo trimestre de 2024.....	7
Tabela 2:Produção de aço bruto no mundo até o segundo trimestre de 2024.	8
Tabela 3:Espessura do bloco de concreto.....	17
Tabela 4: Orçamento original	26
Tabela 5: Composição do item 41406 (Base de escória/argila na proporção 80:20 retirada do DER-ES).....	27
Tabela 6: Memória de cálculo original item 3.8.....	29
Tabela 7: Memória de cálculo original item 3.10.....	29
Tabela 8: Orçamento revestimento primário proporção 80/20 escórias/argilas	30
Tabela 9: Dosagem para produção do bloco de concreto intertravado.....	32
Tabela 10: Composição bloco de concreto intertravado	34
Tabela 11: Orçamento apenas com materiais naturais	35
Tabela 12: Orçamento com base proporção 80/20 escórias/argilas	37
Tabela 13: Dosagem para produção do bloco de concreto intertravado com escória	39
Tabela 14: Custo unitário de 1 m ² do bloco intertravado de concreto com escória	39
Tabela 15: Composição para execução bloco de concreto com escória.....	40
Tabela 16: Otimização da escória no pavimento.....	41
Tabela 17: Comparação valores entre soluções obtidas	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Obra de pavimentação da Rota do Carmo	2
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Objetivos específicos	3
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1	Siderurgia	4
2.1.1	Siderurgia no Brasil e no mundo	5
2.1.2	Produção de aço brasileira e mundial	6
2.1.3	Escória	8
2.1.4	Escória de alto-forno.....	9
2.1.5	Escória de aciaria	12
	2.1.5.1 Escória de aciaria LD	12
2.1.6	Revsol e Revsol Plus®.....	13
2.2	Pavimentação.....	15
2.2.1	Dimensionamento de pavimentos intertravados	15
2.2.2	Camadas de pavimentos.....	18
	2.2.2.1 Regularização do subleito	18
	2.2.2.2 Reforço do subleito	20
	2.2.2.3 Sub-base	20
	2.2.2.4 Base	20
	2.2.2.5 Revestimento	21
	2.2.2.5.1 Revestimento primário.....	21
	2.2.2.5.2 Bloco intertravado de concreto	23
3	METODOLOGIA DE ESTUDO.....	24
4	OBTENÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	27
4.1	Revestimento primário com mistura de Revsol e argila.....	27
4.2	Pavimentação com materiais naturais.....	31
4.3	Base com mistura de Revsol e argila.....	37
4.4	Otimização da escória na pavimentação.....	38
4.5	Comparações entre os resultados.....	42

5	CONCLUSÕES	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1 INTRODUÇÃO

A atividade siderúrgica no território brasileiro ocupa uma posição central na dinâmica econômica nacional, contribuindo de maneira expressiva tanto para a geração de empregos quanto para o incremento do Produto Interno Bruto (PIB). Conforme relatório divulgado pelo Instituto Aço Brasil (2023), a produção de aço atingiu a marca de 31,9 milhões de toneladas no ano de 2023, representando 1,7% da produção global, posicionando o país como o nono maior produtor deste insumo fundamental. Tais dados enfatizam a importância da siderurgia na estrutura produtiva tanto local quanto internacionalmente. Desse modo, expectativas futuras apontam um aumento significativo na capacidade produtiva, com projeções indicando que a produção de aço no Brasil está prevista para mais que dobrar até 2050, alcançando 67,2 milhões de toneladas, evidenciando a trajetória de crescimento contínuo do setor (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2017).

Paralelamente, o desafio da gestão de resíduos emerge como uma questão iminente. Em 2020, foram gerados aproximadamente 622 kg de resíduos por cada tonelada de aço bruto fabricado, dos quais 93% possuem potencial de reaproveitamento (IAB, 2020). Contudo, os 7% restantes ainda carecem de uma solução de destinação adequada, acumulando-se em estoques ou sendo dispostos em aterros sanitários (IAB, 2020). Assim, esse quadro enfatiza a necessidade de abordagens inovadoras para o tratamento e a reutilização de resíduos na indústria siderúrgica, visando à minimização do seu impacto ambiental.

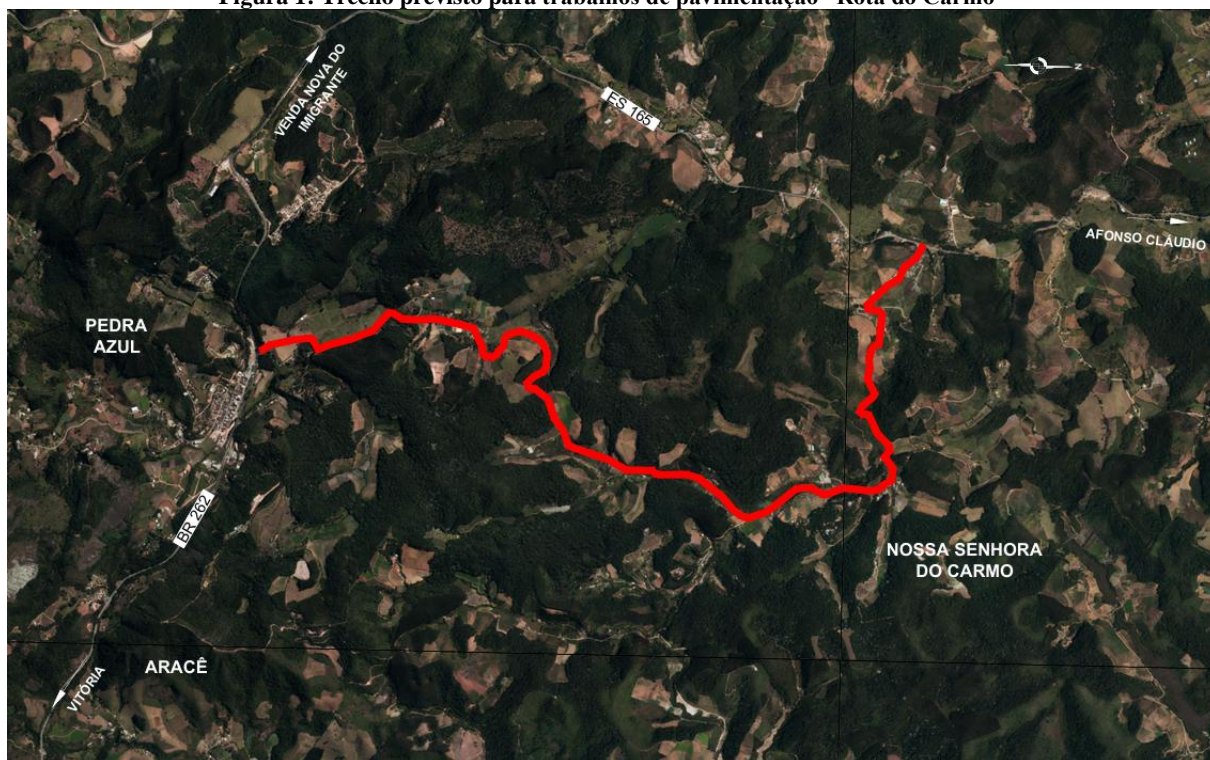
O programa “Caminhos do Campo”, iniciativa da Secretaria da Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca do Espírito Santo, visa pavimentar e melhorar as estradas rurais e municipais do estado. Com foco especial nas regiões de intensa agricultura familiar, o programa tem em vista facilitar o transporte e reduzir as perdas e custos de produtos perecíveis, melhorando assim a qualidade de vida das comunidades rurais e incentivando o agroturismo. Ao pavimentar as estradas, não apenas a mobilidade local é aprimorada, mas também são criadas novas oportunidades econômicas, como agroindústrias e turismo rural.

Dentro deste contexto, foi escolhida para a realização de um estudo de caso, a obra do programa “Caminhos do Campo” localizada na Rota do Carmo, em Pedra Azul. A obra tem como característica a utilização de blocos intertravados de concreto, integrando resíduos siderúrgicos como material de base. Diante disso, este estudo visa elaborar uma avaliação comparativa no âmbito econômico e de desempenho entre a utilização desses resíduos siderúrgicos em comparação ao emprego de materiais naturais.

1.1 Obra de pavimentação da Rota do Carmo

O projeto discutido neste documento inclui as obras de pavimentação e drenagem da estrada Rota do Carmo, na região de Aracê, Domingos Martins. O trecho que totaliza 9,00 km de extensão, é acessado pela rodovia BR-262 (km 90) e termina na ES-165 (km 141), conforme a figura 1.

Figura 1: Trecho previsto para trabalhos de pavimentação “Rota do Carmo”



Fonte: SEAG, 2020

A obra é realizada pelo Governo do Estado do Espírito Santo e pertence ao programa “Caminhos do Campo” desenvolvido pela Secretaria de Estado da Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca (SEAG).

O principal objetivo do Programa é melhorar e pavimentar as estradas rurais do Estado, buscando aprimorar a trafegabilidade para os veículos responsáveis pelo escoamento da produção, a fim de reduzir custos e minimizar perdas de produtos perecíveis. Além disso, o Programa visa facilitar a mobilidade da população local e impulsionar o desenvolvimento do agroturismo.

A obra está sendo realizada em duas etapas e, na segunda etapa, a construção, envolve um investimento de 17,9 milhões e 50.447,110 m² de pavimentação com blocos intertravados de concreto.

Os trabalhos de construção no local iniciaram em 2022 e tem conclusão prevista para o ano de 2025.

1.2 Objetivos

Realizar um estudo de caso da obra do programa do governo do estado do Espírito Santo chamado “Caminhos do Campo” realizada em Rota do Carmo no município de Domingos Martins-ES, elaborando uma análise comparativa de orçamento para o uso do resíduo de siderurgia nas diversas camadas do pavimento.

1.3 Objetivos específicos

- Analisar os custos da utilização do Revsol na execução da base de pavimentos em blocos intertravados de concreto;
- Analisar os custos da execução da base de pavimentos em blocos intertravados de concreto utilizando exclusivamente materiais naturais;
- Analisar os custos do uso da escória de alto-forno na fabricação e no assentamento dos blocos intertravados de concreto;
- Comparar os custos da execução de revestimento primário com mistura de Revsol com as demais soluções apresentadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Siderurgia

Metalurgia é a ciência focada na extração de metais a partir de seus minérios agregando alguma utilização, por exemplo industrial, a estes produtos finais. A Siderurgia é o ramo da Metalurgia dedicado particularmente à metalurgia do ferro, que consiste basicamente na produção de aço através da redução de carbono.

O processo mais comum e utilizado para a fabricação do aço consiste na produção de ferro fundido no alto-forno e refinamento desse produto, que consiste na adição de elementos de liga em pequenas porcentagens no conversor de oxigênio. Há também maneira de obter aço a partir de ferro secundário, isto é, quando a matéria-prima é sucata de aço, não havendo necessidade da etapa de redução do minério de ferro. Nesse caso, a sucata é transformada novamente em aço comercial, por meio do emprego de fornos elétricos de fusão. (Mourão et al., 2007)

Segundo Mourão et al. (2007), em indústrias siderúrgicas modernas, o processo de obtenção do aço consiste nas seguintes etapas principais:

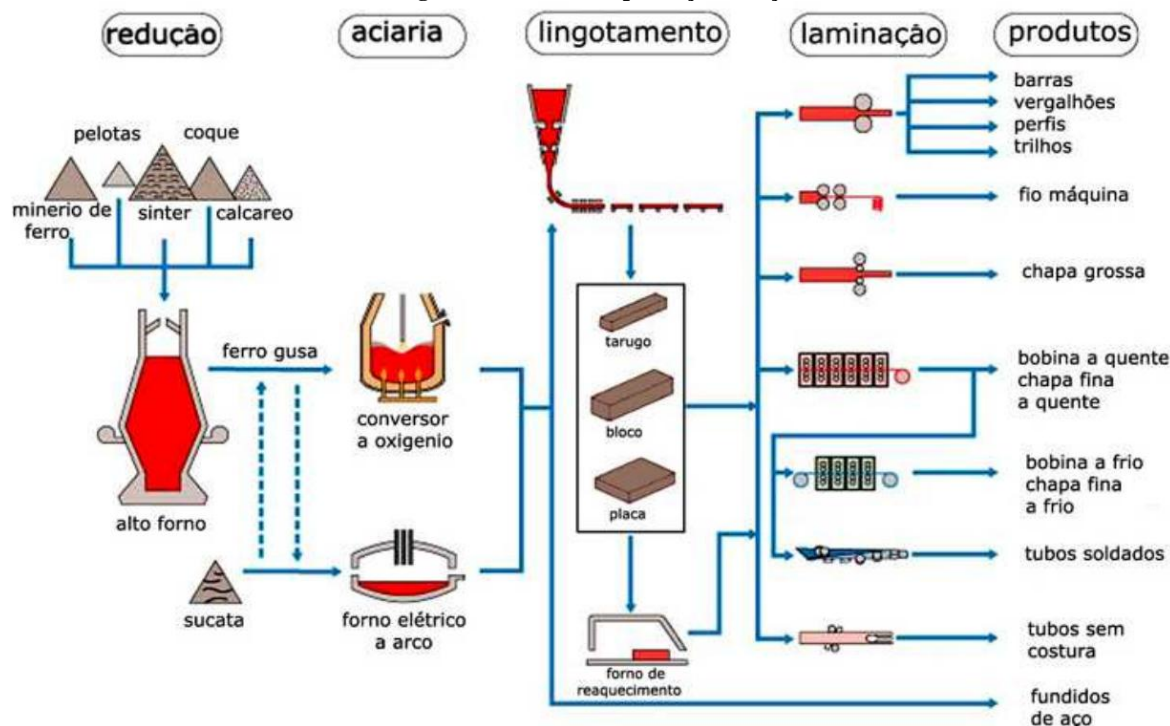
- Extração do ferro de seu minério nos altos-fornos
- Conversão do ferro-gusa, produto intermediário, em aço
- Lingotamento do aço líquido
- Conformação do metal em forma de produto final

Durante a primeira etapa, nos altos-fornos, são carregados, na parte superior do forno, minério, calcários (fundentes), e coque (carvão). Na parte inferior, o ar insuflado efetua a reação de redução e eleva a temperatura até o ponto de fusão do ferro gusa e das escórias formadas pela reação. O ferro e a escória fundidos são retirados do forno e apenas o ferro fundido é transportado até o conversor de oxigênio, onde é realizado o refinamento deste através da remoção do excesso de carbono.

O processo, no conversor de oxigênio, baseia-se na injeção de oxigênio na massa líquida de ferro fundido possibilitando que o carbono presente se transforme em monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂) e seja expelido do ferro fundido. Elementos como manganês, silício e fósforo são oxidados e combinados com cal e óxido de ferro, formando, mais uma vez, escória que sobrenada o aço liquefeito.

Após as etapas anteriores, o ferro fundido é lançado em formas para que se solidifique como lingotes. A figura 2 ilustra de forma resumida todo processo produtivo do aço.

Figura 2: Processo de produção do aço



Fonte: Oliveira, 2012

2.1.1 Siderurgia no Brasil e no mundo

A história da siderurgia tem suas raízes na Idade do Ferro, quando o homem começou a dominar o uso do ferro para a fabricação de ferramentas e armas. No entanto, a siderurgia, tal como a conhecemos, começou a se desenvolver significativamente durante a Revolução Industrial, a partir do século XVIII (CARVALHO; MESQUITA; ARAÚJO, 2015; MOURÃO et al., 2007). O avanço tecnológico permitiu a produção em larga escala de ferro e, posteriormente, de aço, materiais que se tornaram essenciais para a construção de infraestruturas, máquinas e outros bens industriais (TEIXEIRA et al., 2019).

Com o advento do alto-forno e a utilização de coque no lugar do carvão vegetal, a eficiência dos processos de produção de ferro aumentou consideravelmente. O aço, uma liga de ferro e carbono, tornou-se o principal material utilizado na indústria, devido às suas propriedades de resistência e maleabilidade, fundamentais para aplicações em setores como construção, transporte e energia (CARVALHO; MESQUITA; ARAÚJO, 2015; MOURÃO et al., 2007; TEIXEIRA et al., 2019).

No Brasil, a siderurgia começou a se desenvolver com mais intensidade no século XX, especialmente com a criação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) em 1941, durante o

governo de Getúlio Vargas, como parte da estratégia de industrialização do país. A CSN, localizada em Volta Redonda, no Rio de Janeiro, foi a primeira grande usina siderúrgica do Brasil e teve um papel crucial no desenvolvimento da infraestrutura nacional, fornecendo aço para a construção de pontes, ferrovias e edifícios (CARVALHO; MESQUITA; ARAÚJO, 2015; TEIXEIRA et al., 2019).

Ao longo das décadas, outras siderúrgicas foram surgindo no país, como a Usiminas e a Companhia Siderúrgica de Tubarão. Desse modo, tais empresas consolidaram o Brasil como um dos principais produtores de aço do mundo, aproveitando-se das vastas reservas de minério de ferro, especialmente na região de Minas Gerais (TEIXEIRA et al., 2019). Assim, a indústria siderúrgica brasileira enfrentou vários desafios ao longo do tempo, como a necessidade de modernização e de adaptação às exigências ambientais.

2.1.2 Produção de aço brasileira e mundial

A produção de aço no Brasil e no mundo revela um panorama de grande relevância para a economia global, com importantes distinções entre as regiões e seus respectivos papéis na cadeia de valor da siderurgia.

O Brasil se posiciona entre os maiores produtores de aço no cenário mundial, concentrando sua produção nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo. No segundo trimestre de 2024, a produção de aço bruto atingiu 16,3 milhões de toneladas (Mt), representando um crescimento de 1,8% em comparação ao mesmo período do ano anterior (IAB, 2024). A distribuição da produção entre os estados brasileiros confirma Minas Gerais como o maior produtor, responsável por 30,2% do aço bruto, seguido por Rio de Janeiro, com 25,8%, e Espírito Santo, com 22,3% (IAB, 2024).

Além disso, o Brasil destaca-se na produção de ferro-gusa, essencial na cadeia produtiva do aço. Até o segundo trimestre de 2024, foram produzidos 12,8 Mt de ferro gusa, representando um aumento de 0,8% em relação ao ano anterior (IAB, 2024). Tal estabilidade na produção reforça o papel estratégico do Brasil como fornecedor de matérias primas para a indústria siderúrgica mundial. A tabela 1 mostra a produção de aço bruto no Brasil até o segundo trimestre de 2024.

Tabela 1: Produção de aço bruto no Brasil até o segundo trimestre de 2024.

Estado/ State	Ferro-gusa/ Pig Iron		Aço Bruto/ Crude Steel		Laminados e semiacabados para vendas/ Rolled products and semifinished products for sale	
	10 ³ t	(%)	10 ³ t	(%)	10 ³ t	(%)
Minas Gerais	4.323,3	33,5	4.942,0	30,2	4.564,1	29,0
Rio de Janeiro	3.344,4	25,9	4.222,7	25,8	4.084,1	25,9
Espírito Santo	3.494,6	27,1	3.639,5	22,3	2.670,8	16,9
São Paulo	-	0,0	1.187,3	7,3	1.818,4	11,5
Outros / Others	1.727,3	13,5	2.353,4	14,4	2.627,5	16,7
Total	12.889,6	100,0	16.344,9	100,0	15.764,9	100,0

Fonte: Instituto Aço Brasil

No contexto global, a produção de aço bruto em 2024 somou 950.236 Mt, (IAB, 2024). A China permanece como o maior produtor mundial, com 526.640 Mt acumuladas em 2024, o que representa 55,4% da produção global. Sua posição dominante reflete a demanda interna massiva e o papel de liderança na cadeia de suprimentos global de aço. Índia e Japão ocupam a segunda e terceira posições, com 74.086 Mt e 42.698 Mt, respectivamente (IAB, 2024).

A distribuição regional da produção revela o domínio asiático, com a Ásia responsável por 73,7% da produção mundial. Esse cenário é impulsionado principalmente pela China e Índia, que continuam a expandir suas capacidades produtivas (IAB, 2024). Em contrapartida, a América Latina apresentou uma produção total de 27.895 Mt em 2024, dos quais o Brasil contribui com 58,6%, consolidando-se como o maior produtor da região (IAB, 2024). Entretanto, apesar de sua importância regional, a participação brasileira no cenário global é modesta quando comparada aos gigantes asiáticos, evidenciando a disparidade na escala de produção entre os continentes. A tabela 2 mostra a produção de aço bruto no mundo até o segundo trimestre de 2024.

Tabela 2: Produção de aço bruto no mundo até o segundo trimestre de 2024.

Região/País Region/Country	2º Trimestre/ 2 nd Quarter			Acumulado até o trimestre/ Year to date			Participação/ Share 2024 (%)
	Abril/ April	Mai/ May	Junho/ June	2024	2023	(%)	
Europa / Europe	14.770	15.653	14.802	89.604	86.920	3,1	9,4
U.E. / E.U.	11.770	12.245	11.539	69.824	69.664	0,2	7,3
Outros Europa / Other Europe	3.000	3.408	3.263	19.780	17.256	14,6	2,1
C.E.I. / C.I.S.	7400	7.585	7.396	43.978	43.904	0,2	4,6
Rússia / Russia	6.113	6.230	6.047	36.832	37.948	-2,9	3,9
Ucrânia / Ukraine	715	738	735	3.874	2.829	37,0	0,4
Outros / Others	573	617	614	3.272	3.127	4,6	0,3
América do Norte / North America	7.631	7.993	7.613	46.173	55.817	-17,3	4,9
EUA / USA	6.591	6.866	6.622	39.923	40.935	-2,5	4,2
Canadá / Canada	1.040	1.128	990	6.250	6.285	-0,6	0,7
América Latina / Latin America	4.694	4.395	4.373	27.895	29.366	-5,0	2,9
Brasil / Brazil	2.701	2.555	2.840	16.345	16.050	1,8	1,7
México / Mexico	1.272	1.126	920	7.119	8.230	-13,5	0,7
Argentina	317	312	275	1.877	2.508	-25,2	0,2
Colômbia / Colombia	123	124	100	691	683	1,2	0,1
Outros / Others	281	278	238	1.864	1.895	-1,6	0,2
África / Africa	1.768	1.826	1.648	10.873	10.534	3,2	1,1
Egito / Egypt	896	895	743	5.224	4.779	9,3	0,5
África do Sul / South Africa	349	360	387	2.355	2.400	-1,8	0,2
Outros / Others	523	571	518	3.294	3.355	-1,8	0,3
Oriente Médio / Middle East	5.068	5.215	4.556	28.507	26.947	5,8	3,0
Irã / Iran	3.166	3.253	2.612	16.647	15.722	5,9	1,8
Arábia Saudita / Saudi Arabia	807	830	805	5.086	4.839	5,1	0,5
Outros / Others	1.095	1.132	1.139	6.774	6.387	6,1	0,7
Ásia / Asia	114.429	121.830	119.971	700.518	701.950	-0,2	73,7
China	85.940	92.860	91.610	526.640	531.636	-0,9	55,4
Índia / India	12.224	12.328	11.957	74.086	69.046	7,3	7,8
Japão / Japan	7.054	7.168	7.024	42.698	43.839	-2,6	4,5
Coreia do Sul / South Korea	5.091	5.168	5.160	31.548	33.672	-6,3	3,3
Vietnã / Vietnam	1.827	1.885	1.878	10.980	9.002	22,0	1,2
Outros / Others	2.294	2.421	2.341	14.566	14.755	-1,3	1,5
Oceania	433	454	415	2.688	3.066	-12,4	0,3
TOTAL	156.193	164.951	160.774	950.236	958.504	-0,9	100,0

Fonte: Instituto Aço Brasil

2.1.3 Escória

A escória, cujo termo se origina do latim “scoria” e do grego “skória”, designa um resíduo não metálico, fundido, que surge durante a fusão de metais, resultado de interações químicas entre a matéria-prima e as impurezas oxidadas presentes no processo de refino do metal. Embora seja vista como um subproduto sem valor econômico direto, desempenha uma função essencial no processo siderúrgico ao capturar e separar as impurezas presentes no metal líquido, tanto no processo de fabricação do ferro-gusa quanto na produção do aço (PEREIRA, 1994; BALTAZAR, 2001).

Esse resíduo pode ser gerado em diversos processos metalúrgicos, como a produção de ferro, aço, níquel, manganês e outros metais. Apesar de todas as escórias desempenharem a

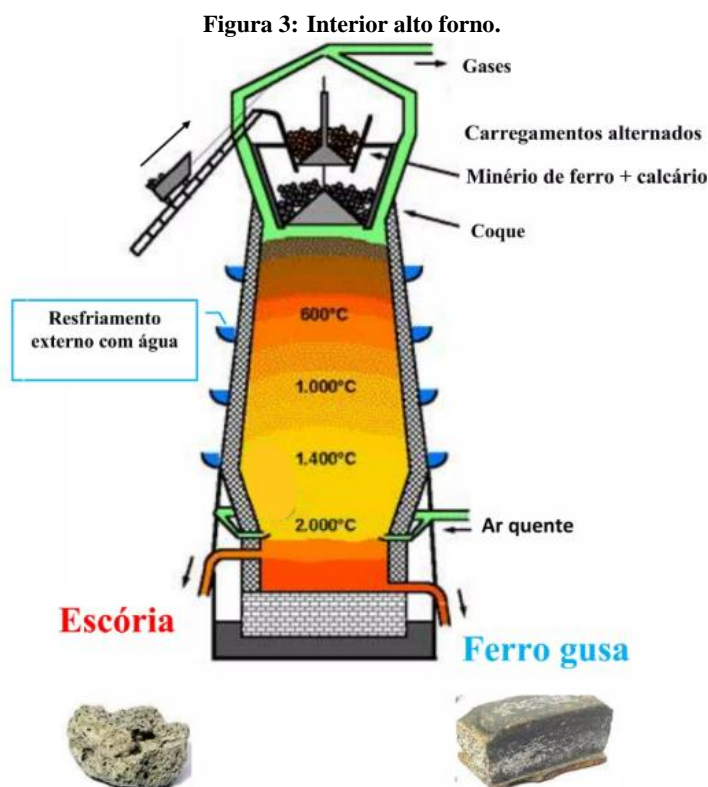
função de remover impurezas, suas propriedades físico-químicas variam significativamente, dependendo da origem e do processo industrial ao qual foram submetidas (BALTAZAR, 2001).

A composição química da escória siderúrgica é notavelmente complexa, pois depende diretamente das matérias-primas utilizadas e dos métodos de fundição aplicados. De maneira geral, as escórias podem ser classificadas em três grandes grupos: escória de alto-forno (blast furnace — BF), escória LD (Blast Oxygen Furnace- BOF) e escória gerada no forno de arco elétrico (electric arc furnace- EAF), sendo que cada uma delas apresenta características e comportamentos distintos, de acordo com o processo específico de produção do metal (GAO et al., 2023).

2.1.4 Escória de alto-forno

A escória de alto-forno configura-se como um subproduto gerado no processo de fabricação do ferro-gusa. Sua formação ocorre internamente no alto-forno, em virtude da combinação química entre as impurezas presentes no minério de ferro, o calcário, a dolomita e as cinzas do carvão mineral. Durante a produção do ferro-gusa, a escória se acumula na parte superior do ferro fundido, que se concentra na base do forno. Nesse sentido, a escória atua como uma camada protetora, impedindo a reoxidação do ferro fundido, a qual poderia ser provocada pelo jato de ar quente que permeia o interior do forno (PIMENTEL et al., 2017; ZEGHICHI, 2006).

Ademais, na etapa subsequente de reaproveitamento, ocorre a separação entre o ferro fundido e a escória na região inferior do forno, denominada cadinho. Nesse momento, enquanto o ferro fundido é conduzido para moldes específicos destinados à fabricação de aço, a escória é direcionada para grandes recipientes, dos quais será posteriormente despejada. Assim, o processo não apenas assegura a eficiência na produção do ferro-gusa, mas também promove o manejo adequado dos subprodutos gerados, garantindo uma operação industrial otimizada (PIMENTEL et al., 2017; SANT'ANA, 2003; ZEGHICHI, 2006). A figura 3 ilustra o interior do alto forno.



Fonte: THOMAZ, Eduardo C. S. Escória de alto forno: Parte 1- Fabricação.

Durante o despejo da escória, ocorre o processo de resfriamento, o qual desempenha um papel na definição dos diferentes tipos de escória que serão gerados. A relevância da análise desse processo está no fato de que a atividade hidráulica da escória é determinada por diversos fatores, dentre os quais se destaca o método de resfriamento aplicado. Existem, em linhas gerais, três tipos principais de resfriamento utilizados na saída do alto-forno: o resfriamento ao ar, a escória expandida e a escória granulada (PIMENTEL et al., 2017; SANT'ANA, 2003; ZEGHICHI, 2006).

No caso do resfriamento ao ar, representado na figura 4, trata-se de um processo lento, no qual a escória é despejada em poços a céu aberto, permitindo que os óxidos presentes se cristalizem, o que resulta na perda de suas propriedades hidráulicas. Consequentemente, essa escória é considerada inerte, apresentando uma granulometria que varia aproximadamente entre 12,5 mm e 150 mm (MASSUCATO, 2005; SANT'ANA, 2003).

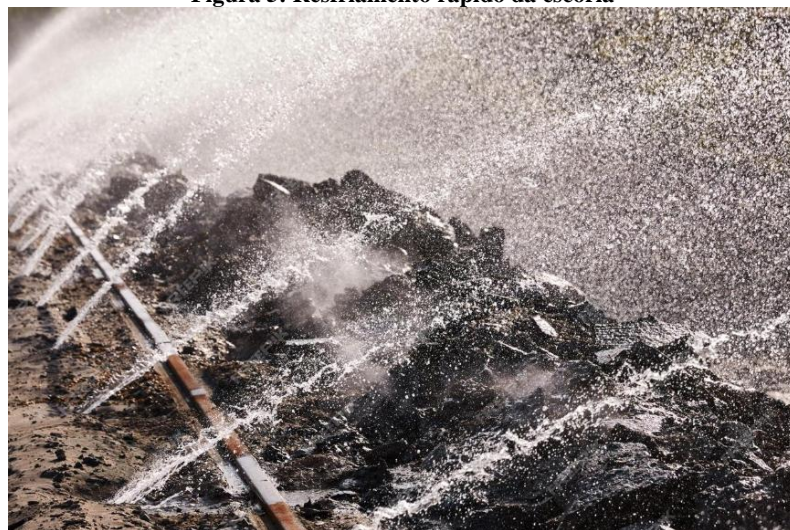
Figura 4: Resfriamento da escória ao ar



Fonte: THOMAZ, Eduardo C. S. Escória de alto forno: Parte 1- Fabricação.

A escória expandida é formada quando a escória fundida é rapidamente despejada em poços com inclinação e fundo úmido, permitindo que o vapor penetre no material ainda em estado líquido. Diante disso, esse processo acelera sua solidificação, o que intensifica sua estrutura vesicular, resultando em um material leve. Posteriormente, esse material passa por moagem e classificação granulométrica, sendo sua granulometria equivalente àquela comumente aplicada aos agregados graúdos, entre 9,5 mm e 32,0 mm. Mesmo com esse método de formação, suas propriedades de durabilidade são comparáveis às da escória resfriada ao ar (MASSUCATO, 2005; SANT'ANA, 2003).

Figura 5: Resfriamento rápido da escória



Fonte: Freepik.

Por outro lado, a escória granulada é gerada por um rápido resfriamento, representado na figura 5, que resulta em uma estrutura química vitrificada. Para isso, jatos de água de alta pressão são aplicados diretamente sobre a escória fundida no momento em que ela sai do forno. A mistura de escória e água ocorre na proporção de uma parte de escória para seis a dez partes de água, podendo a quantidade de água ser ajustada conforme as condições do processo. O resultado desse procedimento é uma escória de estrutura vítrea, com pouca ou nenhuma cristalização. Assim, sua granulometria é semelhante à da areia de rio, e sua massa unitária é aproximadamente de 10 kN/m³. Ainda, essa escória possui uma estrutura porosa e textura áspera, características que impactam seus potenciais aplicações industriais (MASSUCATO, 2005; SANT'ANA, 2003).

2.1.5 Escória de aciaria

A escória de aciaria é um subproduto gerado no processo de fabricação do aço, resultante da separação de impurezas durante o refino do ferro-gusa. Esse subproduto é classificado em dois principais tipos, de acordo com o método de produção: a escória LD (Linz-Donawitz), proveniente do conversor a oxigênio, e a escória de forno de arco elétrico (EAF), oriunda da fusão de sucata de aço em fornos elétricos (FREITAS, MOTTA, 2008). Cada uma dessas escórias possui características distintas de composição química e propriedades físicas, o que influencia suas possíveis aplicações.

2.1.5.1 Escória de aciaria LD

A escória de aciaria LD, representada na figura 6, é um subproduto do refino do ferro gusa em conversores a oxigênio (BOF/LD), apresentando uma composição principalmente formada por CaO, FeO e SiO₂ (CHAND; PAUL; KUMAR, 2015; GONÇALVES; CARNEIRO; ARAÚJO, 2014; JUCKES, 2003). No conversor Linz-Donawitz, a transformação do ferro gusa em aço ocorre com a injeção de oxigênio a alta pressão, promovendo a oxidação e remoção de elementos como carbono, silício e fósforo. O processo dentro do conversor envolve temperaturas que variam entre 1300 e 1450 °C, momento em que o ferro gusa líquido é adicionado ao conversor inclinado, juntamente com sucata metálica. Quando o conversor retorna à posição vertical, uma lança injeta oxigênio puro, induzindo reações exotérmicas que geram energia suficiente para manter ou elevar a temperatura do metal fundido. Durante essas reações, os elementos oxidados combinam-se com a cal (CaO), formando a escória de aciaria,

cuja composição química pode atingir teores de CaO superiores a 35%, enquanto a cal livre pode alcançar 12% (CHAND; PAUL; KUMAR, 2015; GONÇALVES; CARNEIRO; ARAÚJO, 2014; JUCKES, 2003; RAPOSO, 2005).

A escória LD, normalmente descartada em aterros industriais, representa um problema ambiental. No entanto, sua reutilização na construção civil, especialmente na pavimentação, tem sido estimulada no Brasil, principalmente no Espírito Santo, como uma alternativa sustentável ao uso de agregados naturais em bases e sub-base de obras de pavimentação, drenos, gabiões, entre outros (CUNHA,2020).

Figura 6: Escória de aciaria LD peneirada



Fonte: Autor.

2.1.6 Revsol e Revsol Plus®

O Revsol e o Revsol Plus são coprodutos derivados da escória de aciaria, especificamente aquela gerada no processo LD (Linz-Donawitz) durante a conversão do ferro-gusa em aço. Sua principal aplicação é na composição de revestimentos primários para estradas vicinais. No Brasil, a ArcelorMittal Tubarão, localizada no Espírito Santo, é uma das principais produtoras desse material. Anualmente, a empresa transforma aproximadamente 800 mil toneladas de escória LD em cerca de 30 produtos diferentes (Mittal, 2025), sendo os principais deles os seguintes:

1. Revsol Plus I®, composto por 50% Escória de Aciaria LD + 50% Escória KR. Esse produto é usualmente usado em elevação de terreno em argila e em revestimento primário (CUNHA, 2020).
2. Revsol Plus II®, composto por 33% Escória de Aciaria LD + 33% Escória KR + 33% de Escória Granulada. Normalmente usado em base e sub-base de pavimentos com asfalto ou blocos intertravados de concreto (CUNHA, 2020).
3. Revsol Plus III®, composto por 70% Escória Granulada de alto forno + 30% de Escória KR. Normalmente usado em base e sub-base de pavimentos de blocos intertravados ou concreto (CUNHA, 2020).
4. Revsol Plus IV® – 25% Escória Granulada de alto forno + 25% de Escória KR + 25% de LD + 25% de lama de alto forno (CUNHA, 2020).

A figura 7 mostra o local de depósito de Revsol na obra de Rota do Carmo em Domingos Martins.

Figura 7: Depósito de RevSol em Rota do Carmo



Fonte: Dynatest, 2024.

Ademais, no Espírito Santo, a ArcelorMittal mantém uma parceria com a SEAG por meio do programa Caminhos do Campo, beneficiando diversos municípios capixabas.

2.2 Pavimentação

2.2.1 Dimensionamento de pavimentos intertravados

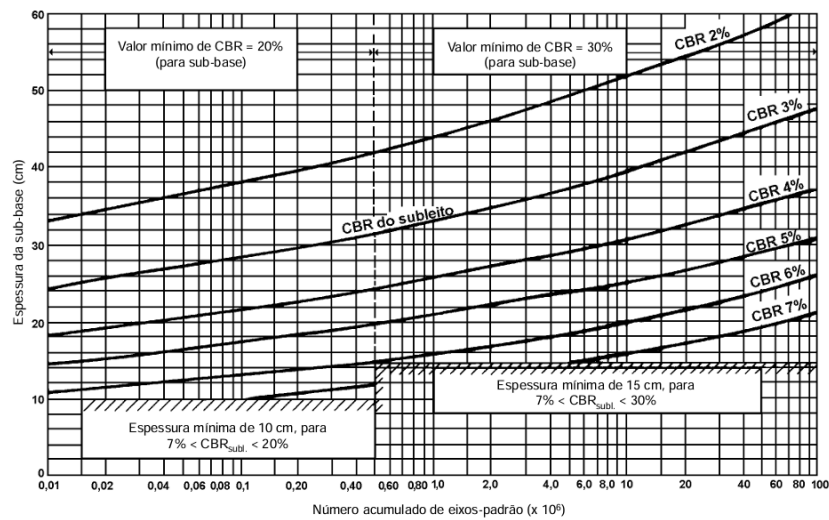
O dimensionamento apresentado neste estudo será o exposto na instrução normativa IP-06 Instrução para dimensionamento de pavimentos com blocos intertravados de concreto, a qual dispõe de dois procedimentos.

O Procedimento A, apresentado na instrução normativa IP-06 da prefeitura de São Paulo, é uma modificação daquele desenvolvido por A. A. Lilley e B. J. Walker, com foco em aplicações voltadas para áreas que suportam tráfego muito leve e leve com “N” até 10^5 solicitações e também tráfego meio pesado a pesado com “N” superior a $1,5 \times 10^6$ solicitações. Dessa forma, baseia-se no uso de dois gráficos de leitura direta, os quais indicam as espessuras adequadas para as camadas que compõem pavimentos de blocos intertravados de concreto (CARVALHO, 1998; OLIVEIRA, 2018).

Neste método, o valor do ISC (Índice de Suporte Califórnia) do subleito é o parâmetro chave, obtido a partir da energia normal de compactação do material. Ademais, o reforço da sub-base é determinado pelo valor mínimo exigido do CBR (California Bearing Ratio), que, combinado com a espessura da camada, depende tanto do volume de tráfego quanto das condições de suporte oferecidas pelo subleito (CARVALHO, 1998).

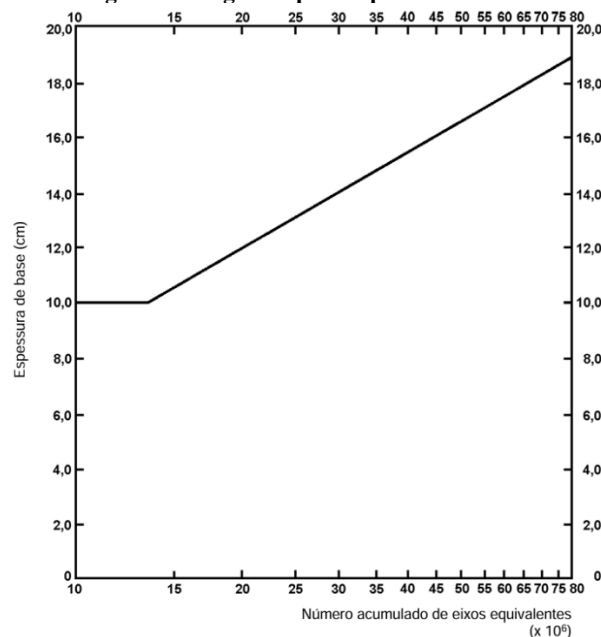
O gráfico em questão, representado na figura 8, tem a função de definir as espessuras da sub-base com base no CBR do subleito e no número acumulado de solicitações de eixos-padrão (N). Há algumas diretrizes importantes a serem observadas (CARVALHO, 1998):

1. Quando o número de solicitações (N) for maior ou igual a $0,5 \times 10^6$, a sub-base deve possuir um CBR mínimo de 30%;
2. Se o número de solicitações (N) for inferior a $0,5 \times 10^6$, o CBR mínimo exigido para a sub-base pode ser de 20%;
3. Em casos onde o número de solicitações for menor que $0,5 \times 10^6$ e o subleito apresentar um CBR igual ou superior a 20%;
4. Da mesma forma, se o número de solicitações for maior ou igual a $0,5 \times 10^6$ e o subleito tiver um CBR igual ou superior a 30%.

Figura 8: Diagrama para espessura de sub-base.

Fonte: Carvalho (1998)

O gráfico apresentado na figura 9 demonstra a espessura necessária para a camada de base, seja de concreto rolado ou solo-cimento, em função do número de solicitações do eixo padrão (N). Além disso, é importante observar que, se o número de solicitações do eixo padrão for inferior a $1,5 \times 10^6$, a camada de base não será necessária. Entretanto, quando o número de solicitações está entre $1,5 \times 10^6$ e 10^7 , recomenda-se que a espessura mínima da base seja de 10 cm (CARVALHO, 1998).

Figura 9: Diagrama para espessura de base.

Fonte: Carvalho (1998)

Para definir a espessura do bloco de concreto, utiliza-se a tabela 3 a seguir, que estabelece a relação entre a espessura do bloco e o número de solicitações do eixo padrão (N).

Tabela 3: Espessura do bloco de concreto

TRÁFEGO	ESPESSURA REVESTIMENTO	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES
$N \leq 5 \times 10^5$	6,0 cm	35 MPa
$5 \times 10^5 < N < 10^7$	8,0 cm	35 a 50 MPa
$N > 10^7$	10,0 cm	50 MPa

Fonte: IP-06 — Instrução para Dimensionamento de Pavimentos com Blocos Intertravados de Concreto

O procedimento B, indicado para tráfegos de intensidade média a meio pesada, com número de solicitações "N" variando entre 10^5 e $1,5 \times 10^6$, baseia-se em estudos realizados em diversos países, como Austrália, África do Sul, Grã-Bretanha e Estados Unidos. Desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE), esse procedimento representa uma evolução do método USACE para pavimentos flexíveis, considerando o intertravamento dos blocos e a utilização de bases granulares para garantir estruturas mais seguras.

À vista disso, esse método adota o princípio de que as camadas do pavimento, a partir do subleito, devem ser dispostas de forma a apresentar resistência crescente. Assim, minimizam-se as deformações verticais permanentes, resultantes tanto do cisalhamento quanto da consolidação dos materiais.

Com base na classificação da via em questão e no número de solicitações do eixo simples padrão "N", além do valor do Índice de Suporte Califórnia (CBR) do subleito, a espessura da camada de material granular puro (HBG), que compõe a base sobre o subleito, é determinada pela figura 10. Adicionalmente, é recomendado que a espessura mínima dessa camada granular seja de 15 cm (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO, 2004).

Figura 10: Espessura da base granular
Espessura necessária de base puramente granular (H_{BG}) - Procedimento B

N.º de Solicitações equivalente do eixo padrão de 8,2 t (kN)	ESPESSURA DA BASE (H _{BG})										
	Valor do índice de Suporte Califórnia do Subleito										
	2	2,5	3	3,5	4	5	6	8	10	15	20
(10')	27	21	17								
2 x 10 ³	29	24	20	17							
4 x 10 ³	33	27	23	19	17						
8 x 10 ³	36	30	25	22	19						
(10 ⁴)	37	31	26	23	20						
2 x 10 ⁴	41	34	29	25	22	17					
4 x 10 ⁴	44	37	32	28	24	19					
8 x 10 ⁴	48	40	35	30	27	21	17				
(10 ⁵)	49	41	36	31	28	22	18				
2x10 ⁵	52	44	38	34	30	24	19				
4x10 ⁵	56	47	41	36	32	26	21				
8x10 ⁵	59	51	44	39	34	28	23				
(10 ⁶)	60	52	45	40	35	29	23	16			
2x10 ⁶	64	55	47	42	38	30	25	17			
4x10 ⁶	68	58	50	45	40	33	27	19			
8 x 10 ⁶	71	61	53	47	42	34	29	20			
(10 ⁷)	72	62	54	48	43	35	30	21			

Mín. 15

Fonte: IP-06 — Instrução para Dimensionamento de Pavimentos com Blocos Intertravados de Concreto

Neste método, os blocos pré-moldados utilizados no revestimento devem possuir uma espessura mínima de 8 cm. No entanto, em situações de carregamento mais severo, a espessura pode ser aumentada para até 10 cm, conforme a avaliação e critério do projetista, que deverá considerar as especificidades de cada caso.

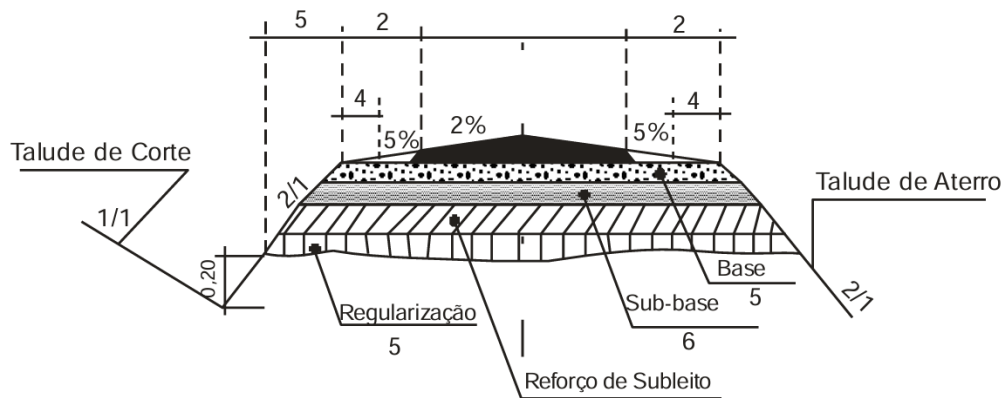
2.2.2 Camadas de pavimentos

2.2.2.1 Regularização do subleito

De acordo com a definição do DNIT exposta no “Manual de Pavimentação”, a regularização do subleito é uma etapa na construção e manutenção de vias, sendo responsável por conformar a superfície do leito de maneira transversal e longitudinal, de acordo com as especificações técnicas do projeto, conforme a figura 11. Além disso, essa operação não é propriamente considerada uma camada de pavimento, podendo ser realizada por meio do corte

do leito já implantado ou pela sobreposição de uma camada adicional, cuja espessura varia conforme especificado no projeto.

Figura 11: Esquema de seção transversal de um pavimento



Fonte: DNIT, 2006.

A realização da regularização do subleito garante uma plataforma uniforme e estável para as camadas subsequentes do pavimento, como por exemplo, se necessário, o reforço do subleito (DNIT, 2006). A figura 12 mostra como é feito o serviço de execução de regularização de subleito.

Figura 12: Execução de regularização de subleito



Fonte: Dynatest, 2024.

2.2.2.2 *Reforço do subleito*

Conforme o DNIT, o reforço do subleito é uma camada de espessura definida, aplicada sobre a regularização, com a finalidade de melhorar a capacidade de suporte do solo e distribuir de forma mais eficiente as tensões decorrentes do tráfego. Além disso, o reforço também contribui para oferecer uma base mais estável e resistente às camadas superiores do pavimento.

A decisão de executar uma camada de reforço do subleito é fundamentada em uma análise técnico-econômica, uma vez que o material utilizado possui características geotécnicas superiores às do subleito original, permitindo que o subleito, inicialmente inadequado para atender às exigências do projeto, seja melhorado, reduzindo a necessidade futura de utilizar técnicas e materiais mais avançados nas camadas superiores do pavimento, dado o ganho estrutural já alcançado no subleito (DNIT, 2006).

2.2.2.3 *Sub-base*

A sub-base é uma camada complementar à base, sendo utilizada em situações em que, por razões técnico-econômicas, a construção da base diretamente sobre a regularização não é recomendada, ou seja, A sub-base tem a mesma função da camada de base, de proporcionar uma melhor distribuição das cargas aplicadas, o que garante um maior suporte estrutural e contribui para a durabilidade do pavimento, evitando que ocorra problemas logo no início da vida útil do pavimento.

Além disso, a sub-base, em algumas situações, melhoram também as condições de drenagem do pavimento já que a granulometria do material é maior que da camada de base. Dessa forma, a inserção de uma sub-base é uma solução estratégica e econômica para assegurar o desempenho adequado da pavimentação, como por exemplo em solos de baixa capacidade de suporte (DNIT, 2005).

2.2.2.4 *Base*

Segundo as diretrizes expostas no “Manual da Pavimentação” do DNIT, A camada de base é a última camada do pavimento antes da aplicação do revestimento, essa camada tem como principais funções resistir e distribuir os esforços devido ao tráfego para as camadas inferiores do pavimento.

Ademais, a camada de base normalmente é feita com material granular, como agregados, solos, cimento, cal, emulsão asfáltica, entre outros (BERNUCCI et al., 2006). Na figura 13, é apresentado como é feito o serviço de execução da camada de base.

Figura 13: Execução de camada de base



Fonte: Dynatest, 2024.

2.2.2.5 *Revestimento*

2.2.2.5.1 Revestimento primário

O revestimento primário, ilustrado na figura 14, é uma solução amplamente utilizada em vias não pavimentadas, composta por uma ou mais camadas compactadas de solo, material granular (formado por agregados naturais ou artificiais), cascalho, saibro ou piçarra. O material é aplicado diretamente sobre o subleito, previamente compactado e regularizado, com o objetivo principal de garantir condições satisfatórias de tráfego, independentemente de adversidades climáticas (DNIT, 2005; DER-PR, 2005).

Conforme o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), aproximadamente 86,5% da malha viária nacional brasileira, que ultrapassa 1,3 milhão de quilômetros, é composta por vias sem revestimento clássico, como asfalto ou concreto. Diante dessa realidade, torna-se evidente a relevância do revestimento primário, sobretudo em regiões

caracterizadas por baixa densidade populacional e recursos financeiros limitados para a execução de pavimentação tradicional.

Figura 14: Revestimento primário com agregados naturais



Fonte: Baesso e Gonçalves, 2003.

O dimensionamento do revestimento primário é essencial para assegurar sua eficiência e durabilidade ao longo do tempo. O método empírico, amplamente utilizado devido à sua simplicidade, baseia-se no Índice de Suporte Califórnia (CBR) e no volume de tráfego pesado, utilizando ábacos apresentados pelo DNIT (2006) para definir as espessuras necessárias das camadas. No entanto, essa abordagem possui limitações, pois não considera diretamente fatores como a resistência ao cisalhamento ou as deformações permanentes dos materiais (NERVIS, 2018).

Por outro lado, o método analítico, mais detalhado, trata o pavimento como uma estrutura de engenharia, utilizando parâmetros de resistência ao cisalhamento, como coesão e ângulo de atrito, descritos pelos critérios de Mohr-Coulomb. Além disso, aplica fatores de segurança (FS) para compensar incertezas nos cálculos, nas condições do material e nos ensaios. Dessa forma, o método analítico garante que as tensões atuantes nas camadas não ultrapassem os limites de resistência, prevenindo falhas estruturais e deformações excessivas (NERVIS, 2018).

Estradas com revestimento primário apresentam uma durabilidade média de 1 a 2 anos, evidenciando a necessidade de promover técnicas adequadas para sua construção e manutenção, visando ampliar sua vida útil. Ademais, a implementação de modelos que avaliem a

durabilidade dessas vias permite a realização de análises econômicas comparativas entre estradas com revestimento primário e outros tipos de pavimentação. (EATON, GERARD, DATTILO, 1987).

2.2.2.5.2 Bloco intertravado de concreto

O pavimento intertravado de concreto, representado na figura 15, é uma alternativa estrutural de pavimentação flexível e rígida composta por blocos de concreto pré-moldados, assentados sobre uma camada de areia e travados por contenção lateral e atrito entre as peças (MACIEL, 2007).

Figura 15: Execução de pavimento intertravado de concreto



Fonte: Dynatest, 2024.

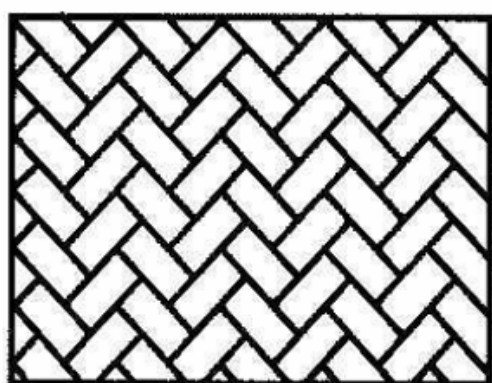
O intertravamento entre os blocos permite uma eficiente distribuição das cargas aplicadas, aliviando as tensões transmitidas ao subleito e às demais camadas do pavimento. Além disso, o pavimento intertravado contribui para a durabilidade da estrutura, oferecendo conforto ao usuário, resistência ao desgaste superficial e adaptabilidade a diferentes condições de tráfego e clima.

Ademais, o pavimento intertravado, conhecido como Paver, possui também uma importante função de drenagem superficial da água, permitindo que o fluxo de água se infiltre nas juntas dos blocos, direcionando a água para o interior do solo. Entretanto, embora esse tipo de revestimento seja conhecido pela função drenante, não deve ser ignorado a necessidade da presença do projeto de drenagem, devendo ser analisado caso a caso (MACIEL, 2007).

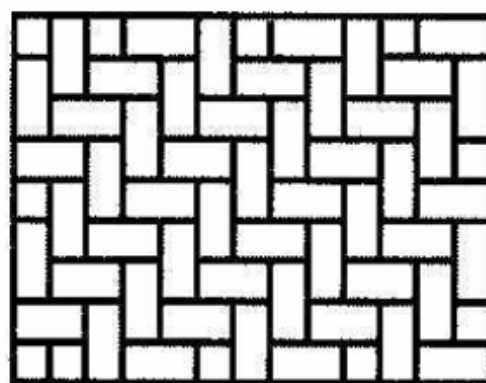
A aplicação do Paver é indicada em áreas urbanas, estacionamentos, vias de baixo e médio tráfego, entre outros, sendo uma solução sustentável e econômica devido à possibilidade de reutilização das peças, misturas na produção do bloco e permeabilidade da superfície, que favorece a drenagem das águas pluviais (CARVALHO, 1998).

O bloco de concreto pode ter diversos formatos e serem aplicados em diferentes arranjos, o arranjo escolhido irá impactar principalmente na estética do pavimento, como é mostrado na figura 16. Sobre a geometria do bloco, não há concordância entre os estudos que confirmem a influência do tipo de arranjo com o desempenho de sua função estrutural (CRUZ, 2003).

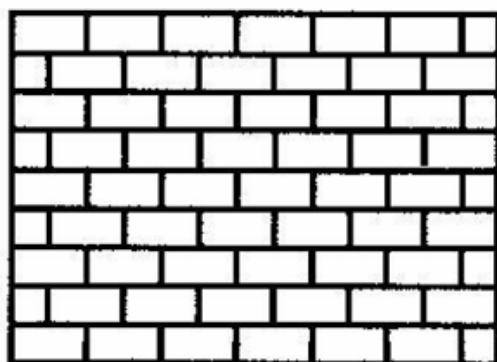
Figura 16: Tipos de arranjos



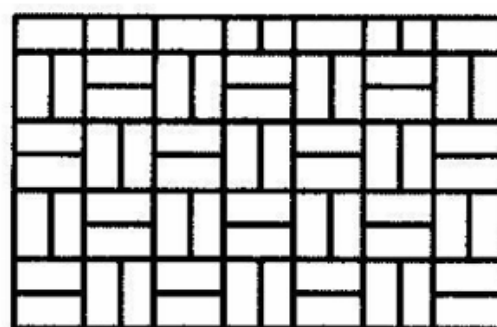
Espinha-de-peixe a 45°



Espinha-de-peixe a 90°



Fileiras



TRAMA

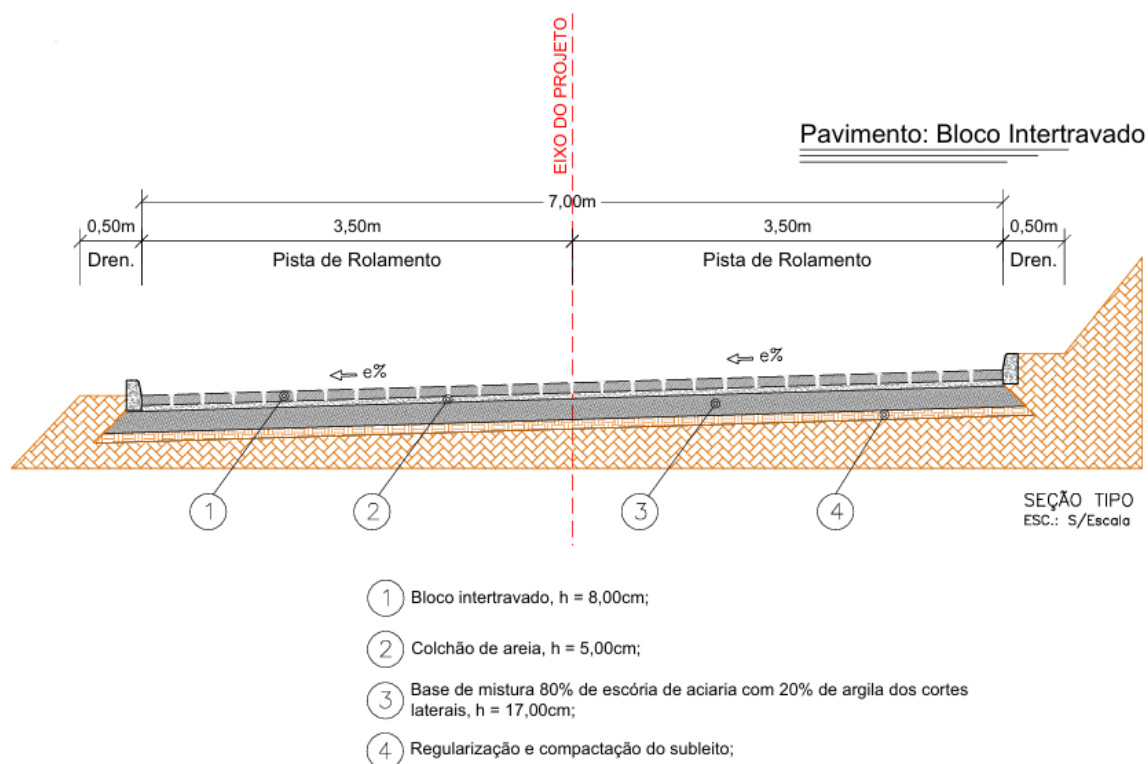
Fonte: Cruz, 2003.

3 METODOLOGIA DE ESTUDO

Para atingir o objetivo do estudo de caso, que consiste na análise comparativa dos custos de diferentes materiais aplicados nas camadas de pavimentação, como o Revsol e a escória de

alto-forno, foram elaborados orçamentos considerando quatro cenários distintos, permitindo realizar uma avaliação da viabilidade econômica e técnica das soluções propostas. O estudo foi conduzido com base em um projeto de dimensionamento de uma obra em andamento, com data base abril/2023, realizada em Rota do Carmo – ES, garantindo que os cálculos realizados refletissem condições reais de execução. Na figura 17, é apresentada a seção transversal do pavimento conforme o projeto elaborado pela SEAG.

Figura 17: Seção transversal Pavimento: Bloco Intertravado



Fonte: SEAG.

Para a elaboração dos orçamentos, foram utilizados os bancos de dados atualizados do Departamento de Estradas de Rodagem (DER), do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) e do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), que fornecem valores unitários e composições feitas para uso em projetos de estradas. O último relatório publicado do DER, do SICRO e do SINAPI foram em janeiro/2024, outubro/2024 e dezembro/2024, respectivamente. A partir disso, foi possível atualizar o orçamento da pavimentação da obra, representado pela tabela 4, utilizando a data-base mais recente.

Tabela 4: Orçamento original

03		PAVIMENTAÇÃO				
3.1	4011209	Regularização do subleito	m²	21.529,220	R\$ 1,36	29.185,33
3.2	CA-002	Revestimento Primário/Base de escória/argila na proporção 80/20 - Transporte e Aquisição escória subsidiados	m³	8.575,900	R\$ 44,16	378.723,61
3.3	40787	Base de brita graduada, inclusive fornecimento e transporte da brita	m³	311,970	R\$ 186,85	58.290,74
3.4	42499	Pavimentação com blocos de concreto (35 MPa), esp.=08cm, sobre colchão de areia 5cm, inclusive fornecim. e transporte blocos e areia, em Vias Urbanas	m²	50.447,110	R\$ 123,03	6.206.507,94
3.5	42504	Remoção e reassentamento de blocos de concreto, inclusive perdas em Vias Urbanas	m²	1.693,980	R\$ 78,47	132.922,12
3.6	4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m³	m³	2.229,740	R\$ 1,84	4.103,76
3.7	5915470	Carga, manobra e descarga de agregados ou solos em caminhão basculante de 6 m³ - carga com escavadeira de 1,56 m³ e descarga livre	t	39.775,020	R\$ 2,71	107.839,22
3.8	5914359	Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia em leito natural	tkm	222.927,340	R\$ 1,43	319.850,57
3.9	5914581	Transporte com caminhão carroceria com capacidade de 9 t e com guindauto de 10 t.m - rodovia em leito natural	tkm	44.296,850	R\$ 2,89	127.988,66
3.10	5914389	Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia pavimentada	tkm	350.057,260	R\$ 0,93	325.598,75
3.11	5914583	Transporte com caminhão carroceria com capacidade de 9 t e com guindauto de 10 t.m - rodovia pavimentada	tkm	797.139,200	R\$ 1,88	1.498.661,55
3.12	5503020	Umedecimento de caminho de serviço	km	86,700	R\$ 361,19	31.314,93
Total Grupo 03:						9.220.987,18

Fonte: SEAG.

Além disso, foram realizadas simulações para a composição de determinados itens do orçamento, incorporando Revsol e escória de alto forno, com o objetivo de obter um novo valor total. Dessa maneira, a metodologia adotada viabilizou a análise comparativa entre os diferentes cenários escolhidos de pavimentação, considerando alternativas com e sem o uso de escória, a fim de avaliar a viabilidade econômica dessas soluções.

Outrossim, também foi simulada a gratuidade do Revsol, considerando que esse material é frequentemente doado devido à parceria entre a ArcelorMittal e o Governo do Estado do Espírito Santo. O objetivo da simulação foi demonstrar a diferença nos valores do orçamento final quando a escória é doada. Para isso, com base na composição da tabela 5, do item 41406 (Base de escória/argila na proporção 80:20, incluindo aquisição e transporte da escória, exceto argila) retirada do banco de dados do DER-ES, adotou-se um custo unitário de R\$ 0,00 para a escória de aciaria, anteriormente avaliada em R\$ 20,31 por tonelada. Dessa forma, o custo direto total apresentado na tabela 5, que antes era de R\$ 73,65, reduziu-se para R\$ 35,63. Após a aplicação do BDI de 23,32%, o novo valor final do serviço foi recalculado para R\$ 43,94.

$$73,65 - 38,02 = R\$ 35,63 * (1 + 23,32\%) = R\$ 43,94 \text{ reais} \quad (1)$$

Tabela 5: Composição do item 41406 (Base de escória/argila na proporção 80:20 retirada do DER-ES)

(A)Equipamento	Código padrão	Quantidade	Ut. Pr	Ut. Impr	Vi. Hr. Prod	Vi. Hr. Imp	Custo Horário
Caminhão tanque L 1319/48 PBT=12,9t (6.000L)	30007	1,0000	1,0000	0,0000	284,28	84,95	284,28
Conjunto moto bomba diam. 4"	30080	1,0000	0,5000	0,5000	26,92	17,26	22,09
Grade de disco GA-24x24 (TATU) ou equivalente	30054	2,0000	0,6000	0,4000	24,48	22,16	47,08
Motoniveladora Caterpillar modelo 120K (cab + ar + ríper) ou equivalente	30022	1,0000	1,0000	0,0000	408,94	135,61	408,94
Rolo AP liso de aço CA 2505 STD Dynapac ou equivalente	30038	1,0000	0,3000	0,7000	327,79	107,75	173,75
Rolo AP vib. patas 100 mm CA-25P (DYNAPAC) ou equivalente	30040	1,0000	0,5000	0,5000	339,58	113,19	226,38
Rolo compactador de pneus CP 224, Dynapac ou equivalente	30033	1,0000	0,5000	0,5000	350,24	120,74	235,49
Trator agrícola MF 297/4 -4 X 4 (MASSEY FERGUSSON) ou equivalente	30030	2,0000	0,6000	0,4000	197,74	51,38	278,38
(A)Total:							1.676,39

(B)Mão-de-Obra	Código padrão	Eq. Salarial	Encargos(%)	Sal/Hora	Consumo	Custo Horário
Encarregado de pista	20063	2,26	157,27	37,31	0,5000	18,65
Greidista	20088	1,24	157,27	20,47	1,0000	20,47
Servente	20002	1,00	157,27	16,51	4,0000	66,04
(B)Total:						105,16

(C)Itens de Incidência	Código padrão	%	M. O.	Equip.	Mat.	Custo
(C)Total:						0,00

Custo Horário da Execução (A) + (B) + (C)					1.781,55
(D) Produção da Equipe					50,0000
(E) Custo Unitário da Execução [(A) + (B) + (C)] / (D)					35,63

(F)Materiais	Código padrão	Unid.	Custo Unitário	Consumo	Custo Unitário
Escória de aciaria, posto em Vitória	10123	t	20,31	1,8720	38,02
(F)Total:					38,02

(G)Serviços	Código padrão	Unid.	Custo Unitário	Consumo	Custo Unitário
(G)Total:					0,00

(H)Itens de Transporte	Código padrão	Unid.	Fórmula	X1	X2	X3	Custo	Consumo	Custo Unit.
Transp. de Escoria de aciaria	1436	t	1,287XP + 1,341XR + 5,365				0,00	1,8720	0,00
(H)Total:									0,00

Custo Direto Total (E) + (F) + (G) + (H)					73,65
BDI:23,32%					17,17
Preço Unitário Total					90,82

Fonte: DER-ES.

Ademais, para efeito comparativo entre as soluções encontradas, foram considerados os seguintes parâmetros: vida útil do pavimento, custo de execução, custo de conservação e impacto ambiental associado ao uso dos materiais. Dessa forma, é possível realizar uma avaliação mais detalhada das alternativas, considerando não apenas o valor final de execução da obra, mas também a sustentabilidade e o custo a longo prazo.

4 OBTENÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

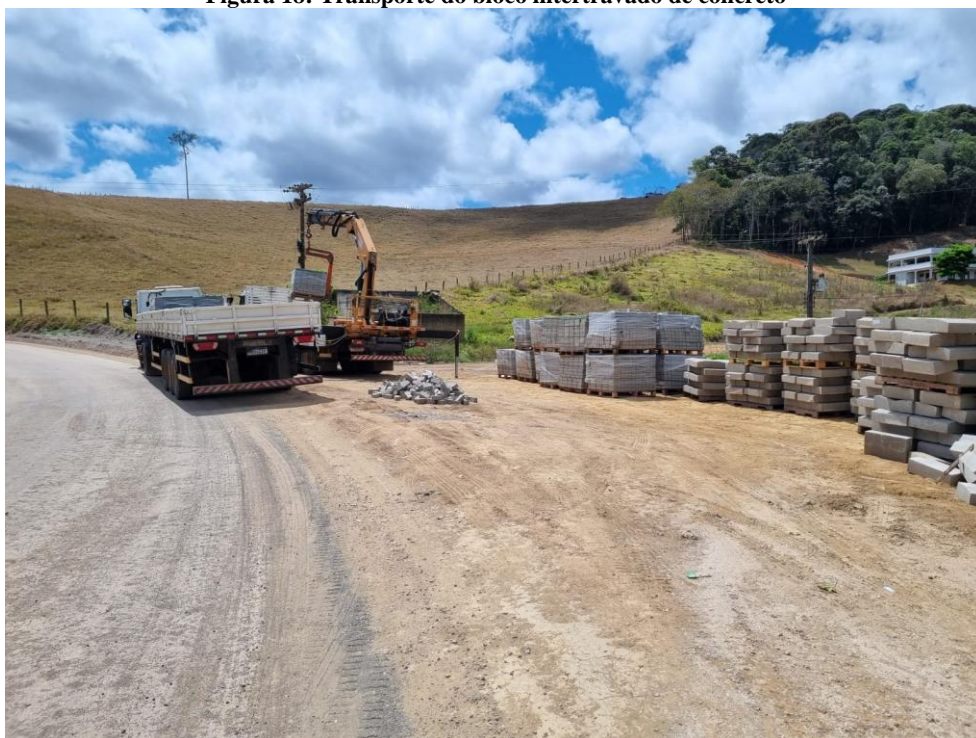
4.1 Revestimento primário com mistura de Revsol e argila

Para a elaboração da nova planilha orçamentária, considerando como solução de pavimentação a camada de revestimento primário composta por uma mistura de 80% de escória e 20% de argila, foram removidos do orçamento original, uma vez que todos estavam relacionados à execução e ao transporte do bloco intertravado de concreto, os seguintes itens:

- Item 3.3 - Base de brita graduada, inclusive fornecimento e transporte da brita;
- Item 3.4 - Pavimentação com blocos de concreto (35 MPa), esp.=08cm, sobre colchão de areia 5cm, inclusive fornecim. e transporte blocos e areia, em Vias Urbanas;
- Item 3.5 - Remoção e reassentamento de blocos de concreto, inclusive perdas em Vias Urbanas;
- Item 3.9 - Transporte com caminhão carroceria com capacidade de 9 t e com guindauto de 10 t.m - rodovia em leito natural;
- Item 3.11 - Transporte com caminhão carroceria com capacidade de 9 t e com guindauto de 10 t.m - rodovia pavimentada.

A figura 18 mostra o transporte e carregamento dos blocos de concreto em caminhão carroceria no trecho de Rota do Carmo.

Figura 18: Transporte do bloco intertravado de concreto



Fonte: Dynatest, 2024.

Além disso, para redistribuir as quantidades necessárias à pavimentação, todo o volume de base de brita graduada foi substituído pela mistura do revestimento primário, resultando em um novo volume total de 8.887,87 m³.

$$311,97 + 8.575,90 = 8.887,87 \text{ m}^3 \quad (2)$$

Ademais, nos itens 3.8 (Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia em leito natural) e 3.10 (transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia pavimentada), representados nas tabelas 6 e 7, foram excluídos da memória de cálculo os custos de transporte da brita graduada e da areia que seria destinada ao assentamento dos blocos de concreto e redistribuiu o volume de transporte excluído da base de brita graduada para o transporte de argila e Revsol, resultando em um novo valor de tonelada por quilômetro de 197.194,08 e 74.231,48, respectivamente.

$$222.927,34 - 11.146,11 - 18.609,97 + (311,97 * 20\% * 1,3 * 1,25 * 1,7) + (311,97 * 80\% * 6,65 * 2,32) = 197.194,08 \text{ tkm} \quad (3)$$

$$350.057,26 - 67.889,97 - 210.541,38 + (311,97 * 80\% * 4,5 * 2,32) = 74.231,48 \text{ tkm} \quad (4)$$

Tabela 6: Memória de cálculo original item 3.8

Material	Estaca Inicial	Estaca Final	Dist (km)	Volume (m³)	Massa Específica	Total (tkm)	Destino
Solo para Base	100 + 0,00	116 + 0,00	1,25	106,08	1,70	225,42	P/CANTEIRO
Solo para Base	116 + 0,00	179 + 0,00	1,25	406,55	1,70	863,91	P/CANTEIRO
Solo para Base	179 + 0,00	251 + 0,00	1,25	477,36	1,70	1014,39	P/CANTEIRO
Solo para Base	251 + 0,00	294 + 0,00	1,25	277,48	1,70	589,64	P/CANTEIRO
Solo para Base	294 + 0,00	338 + 0,00	1,25	291,72	1,70	619,9	P/CANTEIRO
Solo para Base	338 + 0,00	359 + 10,00	1,25	138,74	1,70	294,82	P/CANTEIRO
Solo para Base	359 + 10,00	433 + 9,30	1,25	411,92	1,70	875,33	P/CANTEIRO
Solo para Base	Limpa rodas		1,25	119,89	1,70	254,76	P/CANTEIRO
Revsol	Centro de Distribuição - Trevo Afonso Cláudio		6,65	6860,72	2,32	105847,18	P/CANTEIRO
Mistura Revsol/argila (Canteiro p/pista)			4,50	8575,90	2,14	82585,91	P/PISTA
Areia - Pavimento Intertravado			4,34	2522,36	1,70	18609,97	P/PISTA
Brita Graduado - Base	Pedreira P3		8,80	436,76	2,90	11146,11	P/PISTA
TOTAL						222927,34	tkm

Tabela 7: Memória de cálculo original item 3.10

Material	Local de Origem	Dist (km)	Volume (m³)	Massa Específica	Total (tkm)	Destino
Revsol	Centro de Distribuição - Trevo Afonso Cláudio	4,5	6860,72	2,32	71625,91	P/CANTEIRO
Areia - Pavimento Intertravado	Afonso Cláudio	49,1	2522,36	1,7	210541,38	P/PISTA
Brita Graduado - Base	Pedreira P3	53,6	436,76	2,9	67889,97	P/PISTA
TOTAL					350057,26	tkm

Assim, conforme a tabela 8, chegamos à um valor total da execução do revestimento primário igual a R\$ 1.346.701,70 considerando a escória comprada e R\$ 930.038,36 para a escória doada.

Tabela 8: Orçamento revestimento primário proporção 80/20 escórias/argilas

Base	Itens	Código	Serviço	Unidade	Preço Unitário C/ BDI	Quantidade Contratada	Total
SICRO	3.1	4011209	Regularização do subleito	m²	R\$ 1,41	21.529,22	R\$ 30.356,20
DER-ES	3.2	41406	Revestimento Primário/Base de escória/argila na proporção 80/20 - Transporte e Aquisição escória	m³	Escória Comprada R\$ 90,82	8.887,87	Escória Comprada R\$ 807.196,35
					Escória Doadada R\$ 43,94		Escória Doadada R\$ 390.533,01
DER-ES	3.3	40787	Base de brita graduada, inclusive fornecimento e transporte da brita	m³	R\$ 193,93	0,00	R\$ 0,00
COMP-1	3.4	-	Pavimentação com blocos de concreto (35 MPa), esp.=08cm, sobre colchão de areia 5cm, inclusive fornecim. e transporte blocos e areia, em Vias Urbanas	m²	R\$ 111,51	0,00	R\$ 0,00
DER-ES	3.5	42504	Remoção e reassentamento de blocos de concreto, inclusive perdas em Vias Urbanas	m²	R\$ 83,77	0,00	R\$ 0,00
SICRO	3.6	4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m³	m³	R\$ 1,67	2.229,74	R\$ 3.723,66
SICRO	3.7	5915470	Carga, manobra e descarga de agregados ou solos em caminhão basculante de 6 m³ - carga com escavadeira de 1,56 m³ e descarga livre	t	R\$ 2,55	39.775,02	R\$ 101.426,30
SICRO	3.8	5914359	Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia em leito natural	tkm	R\$ 1,52	197.194,08	R\$ 299.735,00

SICRO	3.9	5914581	Transporte com caminhão carroceria com capacidade de 9 t e com guindauto de 10 t.m - rodovia em leito natural	tkm	R\$ 2,93	0,00	R\$ 0,00
SICRO	3.10	5914389	Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia pavimentada	tkm	R\$ 0,99	74.231,48	R\$ 73.489,16
SICRO	3.11	5914583	Transporte com caminhão carroceria com capacidade de 9 t e com guindauto de 10 t.m - rodovia pavimentada	tkm	R\$ 1,91	0,00	R\$ 0,00
SICRO	3.12	5503020	Umedecimento de caminho de serviço	km	R\$ 354,96	86,70	R\$ 30.775,03
						Escória Comprada TOTAL	R\$ 1.346.701,70
						Escória Doad TOTAL	R\$ 930.038,36

4.2 Pavimentação com materiais naturais

Para a elaboração da planilha orçamentária referente à solução de pavimentação com a execução de blocos intertravados de concreto utilizando exclusivamente materiais naturais, foram removidos os itens 3.2 (Revestimento Primário/Base de escória/argila na proporção 80/20), 3.6 (Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m³) e 3.7 (Carga, manobra e descarga de agregados ou solos em caminhão basculante de 6 m³ - carga com escavadeira de 1,56 m³ e descarga livre), pois esses estavam associados à execução da base com mistura de Revsol, incluindo serviços como carga e mistura do material. Para garantir a redistribuição do volume de material na obra, toda a quantidade retirada do item 3.2 (Revestimento Primário/Base de escória/argila na proporção 80/20) foi incorporada ao item 3.3 (Base de brita graduada).

A figura 19 ilustra o item 3.6 (Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m³).

Figura 19: Escavação e carga de material de jazida

Fonte: Dynatest, 2024.

Ademais, outra modificação foi feita no item 3.4, referente à pavimentação com blocos de concreto (35 MPa). No orçamento original, a empresa utilizou uma composição própria para esse item, entretanto, neste estudo, optou-se por fazer uma nova composição, apresentada na tabela 10, com um novo custo unitário para a fabricação dos blocos, garantindo maior padronização e uma melhor comparação com a dosagem que será utilizada na produção dos blocos com escória posteriormente. Na composição, para o custo da água, foi considerada a tarifa industrial da CESAN para uma empresa que gasta mais de 50 m³ de água por mês. Na tabela 9 é apresentada a dosagem utilizada para a fabricação dos blocos de concreto.

Tabela 9: Dosagem para produção do bloco de concreto intertravado

BASE	Material	Unidade	Preço Unitário	Quantidade (Kg)	Total (R\$)
SINAPI	Granilha	kg	R\$ 0,27	550	R\$ 148,50
SICRO	Areia do Vale fina	kg	R\$ 0,09	1050	R\$ 96,99
SINAPI	Cimento CP 3	kg	R\$ 0,59	300	R\$ 177,00
CESAN	Água	kg	R\$ 0,0139	130	R\$ 1,80
			Total	2030	R\$ 424,29

Outrossim, foram coletados dados no site da empresa fabricante dos blocos utilizados na obra, indicando que a produção de 1m² de bloco requer aproximadamente 170 kg da mistura de materiais, como é apresentado na figura 20.

LINEFORT



Figura 20: Dados de produção do bloco

DIMENSÕES	ESPESSURA	QUANTIDADE	PESO (APROX.)
10 x 20 cm	6 cm	50 pç/m²	130 kg/m²
10 x 20 cm	8 cm	50 pç/m²	170 kg/m²
10 x 20 cm	10 cm	50 pç/m²	230 kg/m²

Fonte: Cidade Engenharia, 2025.

Portanto, como a dosagem escolhida resulta em uma mistura de materiais com peso total igual a 2030 kg, ela é suficiente para fabricar 11,94 m² de bloco. A partir disso, foi possível determinar que o custo unitário para a fabricação de 1 m² de bloco é R\$ 35,53 reais.

$$\frac{424,29}{11,94} = R\$ 35,53 \qquad (5)$$

Tabela 10: Composição bloco de concreto intertravado

A - EQUIPAMENTOS	Código	Equipamento	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
				Operativa	Improdutiva	Operativa	Improdutiva	
	30032	Rolo AP de pneus AP-26 (8,9t)(MULLER) ou equivalente	1	0,1	0,9	R\$ 320,12	R\$ 115,23	R\$ 135,72
							Custo horário total dos equipamentos	R\$ 135,72
B - MÃO DE OBRA	Código	Mão de Obra	Quantidade	Sal/Hora			Custo Horário Total	
	20035	Calceteiro	1				R\$ 20,47	R\$ 20,47
	20065	Encarregado de pavimentação	0,5				R\$ 37,31	R\$ 18,66
	20002	Servente	2				R\$ 16,51	R\$ 33,02
							Custo horário total da mão de obra	R\$ 72,15
C- ITENS DE INCIDÊNCIA	Código	Itens de incidência	%				Custo Horário	
	2000	Ferramentas manuais	5					R\$ 3,60
							Custo total das atividades auxiliares	R\$ 3,60
							Custo horário total de execução	R\$ 211,46
							Custo unitário de execução	R\$ 50,96
F - MATERIAIS	Código	Materiais	Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Horário	
	10109	Areia grossa, jazida com carregamento mecânico	0,05	m³			R\$ 81,89	R\$ 4,09
	10267	Bloco para pavimentação intertravado - esp = 8 cm, resistência 35 Mpa	1	m²			R\$ 35,53	R\$ 35,53
							Custo total das atividades auxiliares	R\$ 39,62
H - ITENS DE TRANSPORTE	Código	Itens de Transporte	Quantidade	Unidade		Fórmula	Custo Horário	
	1026	Transporte de Areia Grossa	0,05	m³		1,287XP + 1,341XR + 5,365		R\$ 0,00
	1605	Transporte de Bloco p/ pavimentação - esp =8 cm	0,192	t		1,287XP + 1,341XR + 5,365		R\$ 0,00
							Custo total dos transportes	R\$ 0,00
							Custo unitário total	R\$ 90,58

Além disso, nos itens de transporte 3.8 e 3.10, referentes ao transporte em caminhão basculante, conforme demonstrado nas tabelas 5 e 6, o material natural não foi destinado ao canteiro de obras, mas sim diretamente ao local de aplicação. Dessa forma, toda a mistura de Revsol originalmente prevista para o canteiro foi simulada como brita graduada para base, considerando um transporte em rodovia leito natural e pavimentada a partir de uma distância de 8,80 km e 53,6 km, respectivamente.

Assim, após a realização dos cálculos necessários, obteve-se os seguintes valores nos itens 3.8 e 3.10:

- Cálculo tkm para o item 3.8 (Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia em leito natural):

$$18.609,97 + 11.146,11 + (8.575,90 * 8,8 * 2,9) = 248.613,05 \text{ tkm} \quad (6)$$

- Cálculo tkm para o item 3.10 (Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia pavimentada):

$$(8.575,90 + 436,76) * 2,90 * 53,60 + 210.541,38 = 1.611.469,25 \text{ tkm} \quad (7)$$

Diante disso, encontra-se um valor total da execução do bloco Paver somente com a utilização de materiais naturais igual a R\$ 11.187.174,75, conforme é mostrado na tabela 11.

Tabela 11: Orçamento apenas com materiais naturais

Base	Itens	Código	Serviço	Unidade	Preço Unitário C/ BDI	Quantidade Contratada	Total
SICRO	3.1	4011209	Regularização do subleito	m ²	R\$ 1,41	21.529,22	R\$ 30.356,20
DER-ES	3.2	41406	Revestimento Primário/Base de escória/argila na proporção 80/20 - Transporte e Aquisição escória	m ³	R\$ 90,82	0,00	R\$ 0,00
DER-ES	3.3	40787	Base de brita graduada, inclusive fornecimento e transporte da brita	m ³	R\$ 193,93	8.887,87	R\$ 1.723.624,62

COMP-1	3.4	-	Pavimentação com blocos de concreto (35 MPa), esp.=08cm, sobre colchão de areia 5cm, inclusive fornecim. e transporte blocos e areia, em Vias Urbanas	m²	R\$ 111,70	50.447,11	R\$ 5.634.942,18
DER-ES	3.5	42504	Remoção e reassentamento de blocos de concreto, inclusive perdas em Vias Urbanas	m²	R\$ 83,77	1.693,98	R\$ 141.904,70
SICRO	3.6	4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m³	m³	R\$ 1,67	0,00	R\$ 0,00
SICRO	3.7	5915470	Carga, manobra e descarga de agregados ou solos em caminhão basculante de 6 m³ - carga com escavadeira de 1,56 m³ e descarga livre	t	R\$ 2,55	0,00	R\$ 0,00
SICRO	3.8	5914359	Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia em leito natural	tkm	R\$ 1,52	248.613,05	R\$ 377.891,83
SICRO	3.9	5914581	Transporte com caminhão carroceteria com capacidade de 9 t e com guindauto de 10 t.m - rodovia em leito natural	tkm	R\$ 2,93	44.296,85	R\$ 129.789,77
SICRO	3.10	5914389	Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia pavimentada	tkm	R\$ 0,99	1.611.469,25	R\$ 1.595.354,55
SICRO	3.11	5914583	Transporte com caminhão carroceteria com capacidade de 9 t e com guindauto de 10 t.m - rodovia pavimentada	tkm	R\$ 1,91	797.139,20	R\$ 1.522.535,87

SICRO	3.12	5503020	Umedecimento de caminho de serviço	km	R\$ 354,96	86,70	R\$ 30.775,03
						TOTAL	R\$ 11.187.174,75

4.3 Base com mistura de Revsol e argila

A solução de pavimentação com blocos intertravados de concreto sobre uma base composta por uma mistura de 80% de Revsol e 20% de argila, ilustrada na tabela 12, foi elaborada com base na planilha orçamentária original, uma vez que a metodologia de execução permanece a mesma. Para a atualização da nova planilha, foram apenas revisados os custos unitários de cada item, ajustando-os conforme os valores mais recentes disponíveis nos bancos de dados do DER-ES (janeiro de 2024) e do SICRO (outubro de 2024).

Além disso, também foi modificado o item 3.4, referente à pavimentação com blocos de concreto, do orçamento original, utilizando o custo unitário para execução do serviço de bloco intertravado de concreto obtido através da composição feita anteriormente.

Tabela 12: Orçamento com base proporção 80/20 escórias/argilas

Base	Itens	Código	Serviço	Unidade	Preço Unitário C/ BDI	Quantidade Contratada	Total
SICRO	3.1	4011209	Regularização do subleito	m²	R\$ 1,41	21.529,22	R\$ 30.356,20
DER-ES	3.2	41406	Revestimento Primário/Base de escória/argila na proporção 80/20 - Transporte e Aquisição escória	m³	Escória Comprada R\$ 90,82	8.575,90	Escória Comprada R\$ 778.863,23
					Escória Doadada R\$ 43,94		Escória Doadada R\$ 376.825,04
DER-ES	3.3	40787	Base de brita graduada, inclusive fornecimento e transporte da brita	m³	R\$ 193,93	311,97	R\$ 60.500,34
COMP-1	3.4	-	Pavimentação com blocos de concreto (35 MPa), esp.=08cm, sobre colchão de areia 5cm, inclusive fornecim. e transporte blocos e areia, em Vias Urbanas	m²	R\$ 111,70	50.447,11	R\$ 5.634.942,18
DER-ES	3.5	42504	Remoção e reassentamento de blocos de concreto,	m²	R\$ 83,77	1.693,98	R\$ 141.904,70

			inclusive perdas em Vias Urbanas				
SICRO	3.6	4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m³	m³	R\$ 1,67	2.229,74	R\$ 3.723,66
SICRO	3.7	5915470	Carga, manobra e descarga de agregados ou solos em caminhão basculante de 6 m³ - carga com escavadeira de 1,56 m³ e descarga livre	t	R\$ 2,55	39.775,02	R\$ 101.426,30
SICRO	3.8	5914359	Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia em leito natural	tkm	R\$ 1,52	222.927,34	R\$ 338.849,55
SICRO	3.9	5914581	Transporte com caminhão carroceria com capacidade de 9 t e com guindauto de 10 t.m - rodovia em leito natural	tkm	R\$ 2,93	44.296,85	R\$ 129.789,77
SICRO	3.10	5914389	Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia pavimentada	tkm	R\$ 0,99	350.057,26	R\$ 346.556,68
SICRO	3.11	5914583	Transporte com caminhão carroceria com capacidade de 9 t e com guindauto de 10 t.m - rodovia pavimentada	tkm	R\$ 1,91	797.139,20	R\$ 1.522.535,87
SICRO	3.12	5503020	Umedecimento de caminho de serviço	km	R\$ 354,96	86,70	R\$ 30.775,03
						Escória Comprada TOTAL	R\$ 9.120.223,51
						Escória Doada TOTAL	R\$ 8.718.185,32

4.4 Otimização da escória na pavimentação

Para a formular essa solução, buscando otimizar o uso da escória em diferentes etapas do pavimento, o resíduo foi incorporado na produção dos blocos de concreto, na composição da base e também como material de assentamento dos blocos na via.

O cálculo do valor unitário para a produção dos blocos de concreto foi realizado com base na dosagem apresentada na tabela 13, determinada a partir de valores empíricos, substituindo uma parte da areia por escória de alto-forno.

Tabela 13: Dosagem para produção do bloco de concreto intertravado com escória

BASE	Item	Quantidade	Preço Unitário	Unidade	Total
SINAPI	Granilha	550	R\$ 0,27	kg	R\$ 148,50
-	Escória Alto Forno	800	R\$ 0,06	kg	R\$ 48,00
SICRO	Areia Fina	250	R\$ 0,09	kg	R\$ 23,09
SINAPI	Cimento CP III	300	R\$ 0,59	kg	R\$ 177,00
CESAN	Água	130	R\$ 0,0139	kg	R\$ 1,80
				Total	R\$ 398,39

Como dito anteriormente, na figura 15, utilizamos os mesmos dados coletados no site da empresa fabricante dos blocos, assim, foi possível determinar o custo unitário para a fabricação de 1 m² de bloco, chegando ao valor de R\$ 33,36 reais, exibido na tabela 14.

$$\frac{398,39}{11,94} = R\$ 33,36 \quad (8)$$

Tabela 14: Custo unitário de 1 m² do bloco intertravado de concreto com escória

Total mistura (kg)	Total mistura (R\$)	Quantidade do m ² fabricado	Custo 1 m ²
2030,00	R\$ 398,39	11,94	R\$ 33,36

Ademais, também foi substituído toda a areia do assentamento dos blocos por escória de alto forno, desconsiderando a diferença de distância de transporte entre os dois materiais, simulando como se os dois materiais possuíssem centros de distribuição no mesmo local. Assim, podemos substituir os valores na composição retirada do DER e encontrar um novo valor unitário referente à execução dos serviços de pavimentação dos blocos, conforme a tabela 15.

Tabela 15: Composição para execução bloco de concreto com escória

Tabela 13. Composição para execução bloco de concreto com escória								
A - EQUIPAMENTOS	Código	Equipamento	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
				Operativa	Improdutiva	Operativa	Improdutiva	
	30032	Rolo AP de pneus AP-26 (8,9t)(MULLER) ou equivalente	1	0,1	0,9	R\$ 320,12	R\$ 115,23	R\$ 135,72
							Custo horário total dos equipamentos	R\$ 135,72
B - MÃO DE OBRA	Código	Mão de Obra	Quantidade	Sal/Hora				Custo Horário Total
	20035	Calceteiro	1					R\$ 20,47
	20065	Encarregado de pavimentação	0,5					R\$ 37,31
	20002	Servente	2					R\$ 16,51
							Custo horário total da mão de obra	R\$ 72,15
C- ITENS DE INCIDÊNCIA	Código	Itens de incidência	%				Custo Horário	
	2000	Ferramentas manuais	5				R\$ 3,60	
							Custo total das atividades auxiliares	R\$ 3,60
							Custo horário total de execução	R\$ 211,46
							Custo unitário de execução	R\$ 50,96
F - MATERIAIS	Código	Materiais	Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Horário	
	-	Escória de alto forno	0,05	m³			R\$ 96,00	R\$ 4,80
	10267	Bloco para pavimentação intertravado - esp = 8 cm, resistência 35 Mpa	1	m²			R\$ 33,36	R\$ 33,36
							Custo total das atividades auxiliares	R\$ 38,16
H - ITENS DE TRANSPORTE	Código	Itens de Transporte	Quantidade	Unidade		Fórmula	Custo Horário	
	1436	Transporte de Alto forno	0,05	m³		1,287XP + 1,341XR + 5,365	R\$ 0,00	
	1605	Transporte de Bloco p/ pavimentação - esp =8 cm	0,192	t		1,287XP + 1,341XR + 5,365	R\$ 0,00	
							Custo total dos transportes	R\$ 0,00
							Custo unitário total	R\$ 89,12

Dessa forma, substituiu-se o novo valor obtido para o item 3.4 na tabela de orçamento feita com a solução de base com mistura de RevSol e argila, resultando em um novo orçamento, exibido na tabela 16, que contempla o uso da escória nas camadas de base, no assentamento e na fabricação do bloco.

Tabela 16: Otimização da escória no pavimento

Base	Itens	Código	Serviço	Unidade	Preço Unitário C/ BDI	Quantidade Contratada	Total
SICRO	3.1	4011209	Regularização do subleito	m²	R\$ 1,41	21.529,22	R\$ 30.356,20
DER-ES	3.2	41406	Revestimento Primário/Base de escória/argila na proporção 80/20 - Transporte e Aquisição escória	m³	Escória Comprada R\$ 90,82	8.575,90	Escória Comprada R\$ 778.863,23
					Escória Doadada R\$ 43,94		Escória Doadada R\$ 376.825,04
DER-ES	3.3	40787	Base de brita graduada, inclusive fornecimento e transporte da brita	m³	R\$ 193,93	311,97	R\$ 60.500,34
DER-ES	3.4	42499	Pavimentação com blocos de concreto (35 MPa), esp.=08cm, sobre colchão de escória de aciaria 5cm, inclusive fornecim. e transporte blocos e areia, em Vias Urbanas	m²	R\$ 109,89	50.447,11	R\$ 5.543.632,91
DER-ES	3.5	42504	Remoção e reassentamento de blocos de concreto, inclusive perdas em Vias Urbanas	m²	R\$ 83,77	1.693,98	R\$ 141.904,70
SICRO	3.6	4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m³	m³	R\$ 1,67	2.229,74	R\$ 3.723,66
SICRO	3.7	5915470	Carga, manobra e descarga de agregados ou solos em caminhão basculante de 6 m³ - carga com escavadeira de 1,56 m³ e descarga livre	t	R\$ 2,55	39.775,02	R\$ 101.426,30
SICRO	3.8	5914359	Transporte com caminhão basculante de 10	tkm	R\$ 1,52	222.927,34	R\$ 338.849,55

			m ³ - rodovia em leito natural				
SICRO	3.9	5914581	Transporte com caminhão carroceria com capacidade de 9 t e com guindauto de 10 t.m - rodovia em leito natural	tkm	R\$ 2,93	44.296,85	R\$ 129.789,77
SICRO	3.10	5914389	Transporte com caminhão basculante de 10 m ³ - rodovia pavimentada	tkm	R\$ 0,99	350.057,26	R\$ 346.556,68
SICRO	3.11	5914583	Transporte com caminhão carroceria com capacidade de 9 t e com guindauto de 10 t.m - rodovia pavimentada	tkm	R\$ 1,91	797.139,20	R\$ 1.522.535,87
SICRO	3.12	5503020	Umedecimento de caminho de serviço	km	R\$ 354,96	86,70	R\$ 30.775,03
						Escória Comprada TOTAL	R\$ 9.028.914,24
						Escória Doadá TOTAL	R\$ 8.626.876,05

4.5 Comparações entre os resultados

Para comparar as soluções propostas, foram considerados três principais parâmetros: a vida útil do pavimento, os custos de execução e conservação, e o impacto ambiental associado ao uso dos materiais. Na tabela 17, é apresentada uma comparação entre o valor total de todas as soluções encontradas com a escória comprada e a escória doada.

Tabela 17: Comparação valores entre soluções obtidas

Solução	Total c/ Escória Comprada	Total c/ Escória Doadá
Revestimento Primário c/ escória	R\$ 1.346.701,70	R\$ 930.038,36
Materiais naturais	R\$ 11.187.174,75	-
Base com escória	R\$ 9.120.223,51	R\$ 8.718.185,32
Otimização da escória	R\$ 9.028.914,24	R\$ 8.626.876,05

A partir da análise das tabelas orçamentárias elaboradas neste estudo, observa-se uma diferença significativa no custo de execução da via com revestimento primário utilizando escória de aciaria. Além de ser a opção mais simples do ponto de vista técnico, essa solução apresenta um desempenho satisfatório ao longo de sua vida útil, estimada em aproximadamente

cinco anos. Dessa forma, o revestimento primário se mostra uma alternativa viável para vias vicinais de baixo a médio tráfego, em que se busca uma solução ágil e econômica.

Por outro lado, o pavimento rígido de blocos de concreto intertravado se destaca pela sua durabilidade, com uma vida útil mínima de 20 anos (BIANCHI; BRITO; CASTRO, 2008). Além disso, a pavimentação com blocos Paver oferece alta resistência a ataques químicos e demanda pouca manutenção ao longo do tempo. Outro aspecto positivo é a estética do pavimento intertravado, tornando-o uma opção vantajosa para áreas turísticas, como é o caso da obra analisada no estudo de caso.

Quanto ao aproveitamento do rejeito da produção de aço na construção civil, é algo que tem sido estudado em diversas áreas da engenharia. Neste caso, para o uso em pavimentação, a escória de aciaria demonstra desempenho igual ou superior aos materiais tradicionalmente utilizados, mantém similaridade ao processo de construção da obra padrão e, além disso, apresenta um custo reduzido.

No caso da substituição da areia por escória de alto forno na fabricação do bloco Paver, o resultado foi vantajoso. Em relação à resistência, testes realizados pela empresa fabricante mostram que os blocos mantêm praticamente o mesmo desempenho dos fabricados com materiais tradicionais, além disso, o uso da escória proporcionou uma economia de R\$ 2,17 por metro quadrado produzido em comparação aos blocos exclusivamente com areia. Dessa forma, o benefício financeiro da utilização da escória cresce proporcionalmente com o tamanho da obra, ou seja, quanto maior a extensão da camada de pavimentação, maior será a economia. No estudo de caso analisado, essa substituição resultou em uma redução total de R\$ 109.405,57 somente devido à fabricação dos blocos com escória.

$$\frac{424,29 - 398,39}{11,94} = R\$ 2,17 \text{ reais} \quad (9)$$

$$2,17 * 50.447,11 = R\$ 109.405,57 \text{ reais} \quad (10)$$

Por outro lado, ao utilizar a escória de alto forno no lugar da areia grossa para o assentamento dos blocos, o custo foi um pouco maior. Isso ocorre porque a escória de alto-forno possui uma demanda maior no mercado, elevando seu preço. Nesse caso, o principal benefício de sua utilização passa a ser ambiental. Optar pela escória de alto-forno para assentamento dos blocos de concreto representou um aumento de R\$ 0,71 por metro quadrado, resultando em um custo adicional de R\$ 35.817,45 para toda a extensão da obra.

$$4,80 - 4,09 = R\$ 0,71 \text{ reais} \quad (11)$$

$$0,71 * 50.447,11 = R\$ 35.817,45 \text{ reais} \quad (12)$$

A maior diferença financeira observada ocorreu ao empregar escória de aciaria misturada à argila na execução da base do pavimento. Para uma camada de base com espessura de 17 cm, a economia atingiu R\$ 103,11 por metro quadrado. Como resultado, gerou uma redução total de custos de R\$ 884.261,05 para toda a obra.

$$193,93 - 90,82 = R\$ 103,11 \text{ reais} \quad (13)$$

$$103,11 * 8.575,90 = R\$ 884.261,05 \text{ reais} \quad (14)$$

Além disso, quando consideramos que o Revsol foi doado, a redução no total de custos é ainda maior, atingindo uma economia de R\$ 149,99 reais por metro quadrado, gerando, como resultado, uma redução de custos para toda a obra de R\$ 1.286.299,24 reais.

$$193,93 - 43,94 = R\$ 149,99 \text{ reais} \quad (15)$$

$$149,99 * 8.575,90 = R\$ 1.286.299,24 \text{ reais} \quad (16)$$

Do ponto de vista ambiental, o uso da escória também traz benefícios, uma vez que se trata de um subproduto da siderurgia, ou seja, a sua produção não é o objetivo final do processo industrial. Assim, ao empregar a escória como agregado na pavimentação ou em outras aplicações na engenharia, contribui-se para a sustentabilidade, visto que está reduzindo a exploração de jazidas de materiais naturais e os impactos que abrangem tal exploração tais como, os impactos de custo de transporte de materiais e a emissão de poluentes provenientes da queima de combustíveis nos equipamentos utilizados na extração.

5 CONCLUSÕES

A pavimentação adequada de vias vicinais desempenha um papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico da região, principalmente nos setores do agrocomércio e do

turismo. Vias bem pavimentadas reduzem os custos logísticos para transporte de carga e facilitam o acesso a regiões de interesse, incentivando o fluxo de visitantes e estimulando a economia local.

Diante disso, é imprescindível a constante busca por novos materiais e técnicas de pavimentação, que possam proporcionar soluções mais econômicas, duráveis e sustentáveis. A engenharia civil está em constante evolução, e o emprego de materiais alternativos, como a escória da produção do aço, apresenta-se como uma inovação vantajosa.

O aproveitamento da escória na pavimentação representa uma estratégia sustentável, uma vez que se trata de um subproduto da indústria siderúrgica, cuja geração é inevitável. Ao substituir materiais naturais, como a areia, pela escória, reduz-se a exploração predatória de jazidas, os impactos ambientais do transporte e a emissão de poluentes provenientes da queima de combustíveis fósseis. Ademais, ao atribuir valor econômico a esse resíduo, a prática fortalece a economia circular, promovendo uma utilização mais responsável dos recursos disponíveis.

Esse estudo de caso demonstrou que o uso da escória na pavimentação proporciona economias consideráveis, sem comprometer as qualidades dos materiais convencionais e pouco modificando a forma de construção da obra. No entanto, é importante observar que as políticas de aproveitamento desse material são mais desenvolvidas no Espírito Santo, enquanto outros estados brasileiros ainda não possuem essa prática consolidada.

Dessa forma, como sugestão de trabalhos futuros, pode-se estudar a viabilidade econômica e ambiental da utilização da escória de aço em outros estados do país, onde as políticas de reaproveitamento ainda não estão consolidadas. Estudos comparativos em diferentes regiões podem fornecer dados importantes, incentivando políticas públicas mais abrangentes e contribuindo para a disseminação dessa prática sustentável em âmbito nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCELORMITTAL. **Recycling our waste**, 2025. Disponível em: <<https://corporate.arcelormittal.com/media/cases-studies/recycling-our-waste>>. Acesso em: 10 fev. 2025.

BAESSO, Dalcio Pickler; GONÇALVES, Fernando Luiz R.. **Estradas Rurais: Técnicas Adequadas de Manutenção**. Florianópolis, 2003.

BALTAZAR, Rodrigo Pinheiro. **Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação**. 2001. Universidade Federal de Viçosa, [s. l.], 2001. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/7724>>. Acesso em: 10 set. 2024.

BERNUCCI, Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BIANCHI, Flavia Regina; BRITTO, Isis Raquel Tacla; CASTRO, Verônica Amanda Brombley. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível**. In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto, 2008, Salvador. Anais [...]. São Paulo: IBRACON, 2008. Disponível em: <https://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav_apresentacoes/isis_raquel.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2025.

BRAGA FREITAS, Hérika; GORETTI DA MOTTA, Laura Maria. **Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado**. TRANSPORTES, v. 16, n. 2, 15 set. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/transportes.v16i2.22>. Acesso em: 14 mar. 2025.

BRASIL, Ministério dos Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. DNIT 2006 EM: **manual de pavimentações**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigda_errata_1.pdf>. Acesso em: 15 de jan. de 2025.

BRASIL, Ministério dos Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. DNIT 2006 EM: **manual de estudo de tráfego**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/723_manual_estudos_trafego.pdf>. Acesso em: 15 de jan. de 2025.

BRASIL. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisas. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Conservação Rodoviária**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2005. 564p. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/710_manual_de_conservacao_rodoviaria.pdf>. Acesso em: 15 de jan. de 2025.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Relatório de Insumos e Composições - DEZ/2024 - SEM DESONERAÇÃO**. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_645>. Acesso em: 12 dez. 2024.

CARVALHO, Marcos D. **Pavimentação com peças pré-moldadas de concreto (ET 27)**. Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (ET-27). São Paulo, 1998. 53 p.

CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de; MESQUITA, Pedro Paulo Dias; ARAÚJO, Elizio Damião G. de. **Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade**. BNDES Setorial, n. 41, p. 181-236, 2015. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4287>>. Acesso em: 15 ago. 2024.

CHAND, Sasmita; PAUL, Biswajit; KUMAR, Manish. **An Overview of Use of Linz-Donawitz (LD) Steel Slag in Agriculture**. Current World Environment, v. 10, n. 3, p. 975-984, 25 dez. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.12944/cwe.10.3.29>>. Acesso em: 14 mar. 2025.

COMPANHIA ESPÍRITO-SANTENSE DE SANEAMENTO – CESAN. **Tabela de tarifas – Grande Vitória e Interior**. Vitória, 2024. Disponível em: <https://www.cesan.com.br/wp-content/uploads/2024/08/Tabela-de-tarifas-em-vigor-1.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2025.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto: estudo dos elementos e métodos de dimensionamento**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO DE EDIFICAÇÕES E DE RODOVIAS DO ESPÍRITO SANTO (DER-ES). **Custo referencial de materiais**. Vitória, 2024. Disponível em: <https://der.es.gov.br/Media/der/Documentos/Tabela%20Referencial%20de%20Pre%C3%A7o/Referencial%20de%20Rodovias/2024/05_Materiais%20JAN-24%20Sem%20Desonera%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2024.

DEPARTAMENTO DE EDIFICAÇÕES E DE RODOVIAS DO ESPÍRITO SANTO (DER-ES). **Relatório de Composição do Serviço**. Vitória, 2024. Disponível em: <https://der.es.gov.br/Media/der/Documentos/Tabela%20Referencial%20de%20Pre%C3%A7o/Referencial%20de%20Rodovias/2024/07_Composi%C3%A7%C3%B5es%20JAN-24%20Sem%20Desonera%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Relatório Sicro, Outubro de 2024**. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro_antiga/sudeste/espírito-santo/2024/outubro/outubro-2024>. Acesso em: 12 dez. 2024.

EATON, R. A.; GERARD, S.; DATTILO, R. S.. **A Method for Rating Unsurfaced Roads**. Transportation Research Record, Washington, n. 1106, p.34-43, 1987.

ES NOTÍCIAS. **Caminhos do Campo: obras avançam na Rota do Carmo**. Disponível em: <<https://esnoticias.com.br/2023/03/14/caminhos-do-campo-obras-avancam-na-rota-do-carmo/>>. Acesso em: 10 fev. 2025.

GAO, Wenhao et al. **Comprehensive utilization of steel slag: A review**. Powder Technology, p. 118449, mar. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118449>>. Acesso em: 10 set. 2024.

GONÇALVES, Hugo Filipe Parreiras; CARNEIRO, Carlos André Ruy; ARAÚJO, Túlio Carvalho da Silva. **Estudo microestrutural da escória de convertedor ld e sua relação com o processo de desfosforação.** Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração, v. 11, n. 1, p. 41-49, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.4322/tmm.2014.006>>. Acesso em: 14 mar. 2025.

GUIDINI DA CUNHA, YAGO. **Avaliação das propriedades ambientais do lixiviado de obras geotécnicas melhoradas com coprodutos siderúrgicos.** 2020. 99 p. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020. Disponível em: https://sappg.ufes.br/tese_drupal//tese_14928_Disserta%20o_Yago_Guidini.pdf. Acesso em: 14 mar. 2025.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatísticas da Siderurgia – 2º Trimestre 2024.** Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2024/09/Estatistica-da-Siderurgia_2o_TRI_2024-2.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2024.

JUCKES, L. M. **The volume stability of modern steelmaking slags.** Mineral Processing and Extractive Metallurgy, v. 112, n. 3, p. 177-197, dez. 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1179/037195503225003708>>. Acesso em: 14 mar. 2025.

MACIEL, Anderson Brum, **Dossiê Técnico - Pavimentos Intertravados.** RS: SENAI, 2007. 22 p.

MASSUCATO, Carlos José. **Utilização de escoria de alto-forno a carvão vegetal como adição no concreto.** 2005. 122 p. Dissertação de Mestrado — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/258498>>. Acesso em: 22 ago. 2024.

MOURÃO, Marcelo Breda et al. **Introdução à siderurgia.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. 428 p. ISBN 85-7737-015-1.

NERVIS, Leandro Olivio. **Proposta de metodologia simplificada para o dimensionamento de pavimentos com revestimento primário.** TRANSPORTES, v. 26, n. 1, p. 108-129, 30 abr.

2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.14295/transportes.v26i1.1352>>. Acesso em: 15 jan. 2025.

OLIVEIRA, Cinara Souza de. **Análise Comparativa técnico-econômica entre os pavimentos de concreto asfáltico e blocos intertravados de concreto**. 2018.

OLIVEIRA, Mateus Maciel de. **Logística de abastecimento de sucata para siderurgia: um estudo de caso**. 2012.

PEREIRA, E. A. C. **Aspectos técnicos da gestão de resíduos na gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas a coque**. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO E MATÉRIAS PRIMAS, RESÍDUOS NA SIDERURGIA, 25, 1994, Volta Redonda. Anais. Volta Redonda, 1994. p.187– 199.

PIMENTEL, Maurílio Gomes et al. **Caracterização da Escória de Alto Forno proveniente de Resíduos Industriais visando seu Uso na Construção Civil**. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2017, Belém. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. Belém: [s. n.], 2017. p. 1-5. Disponível em: <https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2017/civil/48_cdedaftpdrivsuncce.pdf>. Acesso em: 4 set. 2024.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. **IP-06: Instrução para dimensionamento de pavimentos com blocos de concreto**. São Paulo, 2004.

RAPOSO, Carlos Olympio Lima. **Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação**. 2005. Universidade Federal do Espírito Santo, [s. l.], 2005. Disponível em: <<http://repositorio.ufes.br/handle/10/6184>>. Acesso em: 14 mar. 2025.

SANT'ANA, Alexandre Pelissari. **Caracterização tecnológica de misturas solo escória de alto-forno granulada moída para fins rodoviários**. 2003. 88 p. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/9665>>. Acesso em: 4 set. 2024.

SÃO PAULO. Secretaria dos Transportes. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo - DER/SP. **ET-DE-POO/013 Revestimento Primário**. São Paulo: Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo - DER/SP, 2006. Disponível em: <https://www.der.sp.gov.br/website/arquivos/normas/et-de-p00-013_a.pdf> Acesso em: 15 jan. 2025.

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA, ABASTECIMENTO, AQUICULTURA E PESCA (SEAG). **Programa Caminhos do Campo**. Disponível em: <<https://seag.es.gov.br/Media/seag/Documentos/Encontro%20secret%C3%A1rios%20municipais/1.%20Caminhos%20do%20Campo.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2025.

SECRETARIA DA AGRICULTURA, ABASTECIMENTO, AQUICULTURA E PESCA. **Volume_01_Relatorio_de_Anteprojeto_Rev2**. Vitória, 2020.

TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez et al. **Os discursos acerca dos desafios da siderurgia na indústria 4.0 no Brasil**. Brazilian Journal of Development, v. 5, n. 12, p. 28290-28309, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.34117/bjdv5n12-016>>. Acesso em: 15 ago. 2024.

THOMAZ, Eduardo C. S. **Escória de alto forno: Parte 1- Fabricação**. In: THOMAZ, Eduardo C. S., Notas de Aula. Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, [S.d.], 51 slides. Notas de aula.

ZEGHICHI, L. **The effect of replacement of naturals agregates by slag products on the strength of concrete**. Asian Journal of Civil Engineering, v. 7, p. 27-35, 2006.

Silva, M. J., Souza, B. P., Mendes, J. C., Brigolini, G. J., Silva, S. N., e Peixoto, R. A. F. (2016). **Feasibility Study of Steel Slag Aggregates in Precast Concrete Pavers**. ACI Materials Journal (39), pag. 439-446.