



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

JÚLIA CHAVES BORGES

**COMPORTAMENTO MECÂNICO-HIDRÁULICO E AVALIAÇÃO DE
CICLO DE VIDA DE CONCRETO PERMEÁVEL PRODUZIDO COM
AGREGADO SIDERÚRGICO**

FORTALEZA

2025

JÚLIA CHAVES BORGES

COMPORTAMENTO MECÂNICO-HIDRÁULICO E AVALIAÇÃO DE
CICLO DE VIDA DE CONCRETO PERMEÁVEL PRODUZIDO COM
AGREGADO SIDERÚRGICO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus* Fortaleza, como requisito final para a obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental

Orientadora: Prof.^a Dra. Teresa Raquel Lima Farias.

FORTALEZA-CE

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B732c Borges, Júlia Chaves.
 Comportamento mecânico - hidráulico e avaliação de ciclo de vida de concreto permeável produzido com agregado siderúrgico / Júlia Chaves Borges. - 2025.
 107 f. : il. color.
- Orientação: Profa. Dra. Teresa Raquel Lima Farias.
1. Agregado Siderúrgico - BSSF. 2. Concreto Permeável. 3. Tração na Flexão. 4. Permeabilidade. 5. Avaliação do Ciclo de Vida. I. Título.

CDD 628

JÚLIA CHAVES BORGES

COMPORTAMENTO MECÂNICO-HIDRÁULICO E AVALIAÇÃO DE
CICLO DE VIDA DE CONCRETO PERMEÁVEL PRODUZIDO COM
AGREGADO SIDERÚRGICO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus* Fortaleza, como requisito final para a obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Aprovado (a) em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Teresa Raquel Lima Farias (Orientadora)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus* Fortaleza

Profa. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza

Profa. Dra. Luciana Barbosa Amancio

Universidade Federal do Piauí (UFPI)

À Deus, pela saúde, força e coragem para nunca desistir dos meus sonhos, e por colocar pessoas especiais no meu caminho. À minha família, em especial à minha mãe, pelas palavras de conforto, por me encorajar a lutar pelos meus objetivos e a ser determinada. Dedico este trabalho a ela, que é essencial em minha vida pessoal, acadêmica e profissional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter realizado todos os meus sonhos pedidos em oração e por me dar forças, até mesmo quando não as tenho, para conquistar meus objetivos, tanto profissionais quanto pessoais.

À minha mãe, por fazer tudo por seus filhos e me encorajar nesse processo do mestrado, sendo minha maior incentivadora nesse caminho difícil. Sem o seu apoio, eu não conseguiria. Jamais poderei retribuir tudo o que ela faz por todos nós. Às minhas irmãs, Juliana e Maria, pelo apoio e pelas conversas sobre a importância de pagar o preço pelas conquistas, além de me confortarem com palavras de coragem. À minha sobrinha, que com sua leveza infantil me faz esquecer das dificuldades da vida e ao meu pai (*in memoriam*), pelo exemplo de profissionalismo, dedicação e por nunca ter deixado faltar nada para os “seus”. Vocês são minha maior riqueza. Amo muito todos vocês.

À minha orientadora, Teresa Raquel Lima Farias, pela excelência na orientação e por estar sempre disposta a contribuir em todas as etapas desta pesquisa. Sou profundamente grata!!! Em especial, ao meu amigo Felipe Bastos, por me acompanhar na coleta das amostras da pesquisa, pelas conversas acompanhadas a cafés e risadas, pelas trocas de conhecimentos acadêmicos e por dividir comigo essa vida intensa da pós-graduação.

À Maria Thereza Chaves, pela ajuda com a Avaliação do Ciclo de Vida dessa pesquisa, referente ao entendimento do programa usado, PaLATE, assim como dos resultados obtidos, a finalização desse mestrado, devo a você!!!

Às minhas amigas, Letícia Sabóia, Cecília Danielle e Esther Maria pelas corridas na Beira Mar, pelas águas de coco e cafés. Vocês não têm ideia de como recarregaram minhas energias com as conversas terapêuticas e sempre perguntando sobre o andamento da pesquisa. Amigas como vocês são tudo o que precisamos nesse processo.

Aos meus colegas de mestrado, Thaís de Araújo, Kilvia Sara, Raissa Braga, Thiago Lucas, Valquíria Lima, Thereza Chaves e Anderson, por me acompanharem academicamente, desde as aulas até algumas etapas importantes desta pesquisa. Vocês são incríveis.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental (PGTGA), agradeço pelas aulas e pelas conversas ao longo dessa jornada: Glória Marinho, Rinaldo, Gemmele Oliveira e Waleska Eloi. Vocês são fontes de inspiração na área acadêmica.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IFCE, em especial ao laboratorista Sabóia e ao bolsista Leandro, pela leveza com que me acompanharam nos ensaios

e pela ajuda na caracterização física dos materiais, sempre demonstrando domínio das normas e ensinamentos, me confortando quando necessário e proporcionando os cafés com tapiocas que adoçaram essa etapa. Agradeço também ao Levi e o Carvalho que ajudaram na intensa demanda dos ensaios laboratoriais. Sem vocês, eu não teria alcançado os objetivos dos experimentos. Muito obrigada!!!

Ao professor Sasaki e ao bolsista Willame, do Laboratório de Raios X do Departamento de Física da UFC, pela realização dos ensaios de caracterização química, pela ajuda na análise dos materiais e pelas conversas e cafés compartilhados nesses momentos.

À Sundamin Refratários Ltda, empresa parceira da ArcelorMittal, pela doação do agregado siderúrgico, especialmente ao Luciano.

À Construtora Vetor, em nome do engenheiro Gustavo Saraiva, que me permitiu sair algumas vezes da construção do Posto de Saúde Pio XII, onde eu trabalhava, durante os horários das aulas obrigatórias do mestrado. Minha mais profunda gratidão. Sempre precisei trabalhar e se consegui atravessar essa fase das disciplinas, especialmente no primeiro ano, sem bolsa, foi graças ao seu entendimento da importância desse título tão almejado em minha vida. Que Deus te retribua em dobro tudo o que você faz pelos seus colaboradores.

À FUNCAP, pela bolsa de pesquisa concedida, que elevou meu rendimento em 100%. E ao CNPq pelo financiamento da pesquisa através do projeto “Avaliação de técnicas compensatórias de baixo impacto para o manejo de águas pluviais urbanas” (processo 405958/2023-4).

À todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para mais essa conquista, meu mais profundo respeito e gratidão.

“É justo que muito custe o que muito vale”

Santa Teresa D’Ávila

RESUMO

A urbanização aumenta a impermeabilização do solo e os desafios de drenagem urbana, gerando impactos ambientais, sociais e econômicos. O concreto permeável apresenta-se como solução promissora para mitigar esses efeitos e promover uma drenagem mais sustentável. Esta pesquisa tem como objetivo avaliar os impactos ambientais, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e analisar o comportamento mecânico-hidráulico de concretos permeáveis produzidos com agregado siderúrgico de escória de aciaria, um coproduto siderúrgico proveniente do processo *BSSF* (*Baosteel's Slag Short Flow*/ Fluxo curto de escória da Baosteel). Para isso, foram utilizados cimento CP V, água, agregado natural e agregado siderúrgico (escória *BSSF*). Três traços diferentes foram analisados: com 100% de agregado natural (100%AN), com substituição de 50% por agregado siderúrgico (50%AS-50%AN) e com 100% de agregado siderúrgico (100%AS). Para os ensaios de resistência, foram moldados seis prismas ($50 \times 15 \times 15$ cm) para teste de tração na flexão e seis corpos de prova cilíndricos (10×20 cm) para ensaio de resistência à compressão, ambos avaliados aos 28 dias. Também foram moldadas placas para a análise da condutividade hidráulica e da porosidade do concreto permeável. Quanto aos resultados mecânicos, o traço com 100%AS apresentou resistência média à tração na flexão de 1,89 MPa e resistência média à compressão de 8,3 MPa. A condutividade hidráulica obtida foi de $2,81 \times 10^{-2}$ cm/s e a porosidade de 30% atendendo aos critérios estabelecidos pela ABNT (2015) e pela ASTM C1754-12M (2012). Na ACV foram avaliados diversos indicadores ambientais, como emissões de gases de efeito estufa, consumo de energia e água, emissão de material particulado, geração de resíduos perigosos, lixiviação de metais pesados (chumbo e mercúrio) e os potenciais de toxicidade humana cancerígena (HTP-C) e não cancerígena (HTP-NC). Os resultados indicaram redução dos impactos ambientais na produção das misturas com agregados siderúrgicos em relação à mistura com agregado natural. Observou-se que o HTP-C, associado à lixiviação, aumentou 11,88% na mistura 50%AS-50%AN e 23,63% na mistura 100%AS, em comparação à 100%AN. Apesar disso, a substituição do agregado natural pelo siderúrgico revelou vantagens: o traço com 50% BSSF e 50% AN apresentou desempenho mecânico superior, enquanto o 100%AS destacou-se pela maior condutividade hidráulica e melhor porosidade, reforçando o potencial do uso de agregados siderúrgicos como alternativa sustentável na produção de concreto permeável.

Palavras-chave: Agregado siderúrgico *BSSF*; Concreto permeável; tração na flexão; Permeabilidade; Porosidade, Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

ABSTRACT

Urbanization increases soil impermeability and urban drainage challenges, generating environmental, social, and economic impacts. Pervious concrete presents a promising solution to mitigate these effects and promote more sustainable drainage. This research aims to evaluate the environmental impacts through Life Cycle Assessment (LCA) and analyze the mechanical-hydraulic behavior of pervious concrete produced with steelmaking aggregate from steelmaking slag, a steelmaking byproduct from the BSSF (Baosteel's Slag Short Flow) process. CP V cement, water, natural aggregate, and steelmaking aggregate (BSSF slag) were used for this purpose. Three different mixes were analyzed: with 100% natural aggregate (100%AN), with 50% replacement by steel aggregate (50%AS-50%AN), and with 100% steel aggregate (100%AS). For the strength tests, six prisms ($50 \times 15 \times 15$ cm) were molded for flexural tensile testing and six cylindrical specimens (10×20 cm) for compressive strength testing, both evaluated at 28 days. Plates were also molded to analyze the hydraulic conductivity and porosity of the pervious concrete. Regarding the mechanical results, the mix with 100%AS presented an average flexural tensile strength of 1.89 MPa and an average compressive strength of 8.3 MPa. The hydraulic conductivity obtained was 2.81×10^{-2} cm/s and the porosity was 30%, meeting the criteria established by ABNT (2015) and ASTM C1754-12M (2012). The LCA evaluated several environmental indicators, such as greenhouse gas emissions, energy and water consumption, particulate matter emissions, hazardous waste generation, heavy metal leaching (lead and mercury), and carcinogenic (HTP-C) and non-carcinogenic (HTP-NC) human toxicity potentials. The results indicated a reduction in environmental impacts in the production of mixtures with steel aggregates compared to the mixture with natural aggregate. It was observed that HTP-C, associated with leaching, increased 11.88% in the 50%AS-50%AN mixture and 23.63% in the 100%AS mixture, compared to 100%AN. Despite this, replacing natural aggregate with steel aggregate revealed advantages: the mix with 50% BSSF and 50% AN presented superior mechanical performance, while 100% AS stood out for its greater hydraulic conductivity and better porosity, reinforcing the potential of using steel aggregates as a sustainable alternative in the production of pervious concrete.

Keywords: BSSF steel aggregate; permeable concrete; flexural tension; permeability; porosity; Life Cycle Assessment (LCA).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Diferentes tipos de sistema de pavimento permeável, como agregado poroso (a), concregrama porosa (b), blocos de pavimentação com juntas abertas (c), asfalto poroso (d), geocélulas de plástico (e), pavimentadores de grades de concreto (f).....	24
Figura 2 — Tipologia de revestimentos de pavimento intertravado permeáveis, segundo NBR 16.416 (ABNT, 2015).....	26
Figura 3 — Sistemas de infiltração do pavimento permeável com base em ABNT (2015)	27
Figura 4 — Fases metodológicas.....	30
Figura 5 — Publicações por países de origem na base de dados do Scopus e Web of Science	31
Figura 6 — Nuvem de palavras fornecidos pelo Bibliometrix.....	31
Figura 7 — Produção mundial de aço bruto.....	46
Figura 8 — Processo de resfriamento e beneficiamento da escória de aciaria LD por Fluxo curto de escória da Baosteel (BSSF).....	48
Figura 9 — Local de coleta (a) e seleção (b) do agregado natural	52
Figura 10 — Local da coleta do agregado siderúrgico BSSF (a) e separação das amostras com auxílio de peneirador elétrico(b).....	53
Figura 11 — Fluxograma de processo.....	55
Figura 12 — Mistura dos materiais na betoneira (a), Moldagens das placas (b), corpos-de-prova cilíndricos (c) e prismáticos (d)	61
Figura 13 — Corpos de prova prismáticos e cilíndricos no tanque para cura	62
Figura 14 — Abatimento zero do concreto permeável para o traço 50%AS-50%AN.....	63
Figura 15 — Moldagem da placa de concreto permeável (a) e placa desmoldada (b) para ensaio de coeficiente de permeabilidade para traço de 100% de agregado siderúrgico.	64
Figura 16 — Ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade (k) na placa de concreto permeável.....	65
Figura 17 — Ensaio de porosidade na placa.	66
Figura 18 — Corpos-de-prova cilíndrico para o ensaio de resistência à compressão.....	67
Figura 19 — Ensaio de resistência à tração na flexão.....	68
Figura 20 — Esquema funcional experimental	69
Figura 21 — Composição granulométrica dos agregados.....	70
Figura 22— Representação do FRX das amostras dos agregados siderúrgicos analisados	74
Figura 23 — Difratoograma de Raio X do agregado siderúrgico	75

Figura 24 — Resistência à compressão dos CP's cilíndricos.....	76
Figura 25 — Resistência à tração dos corpos-de-prova prismáticos.....	78
Figura 26 — Coeficiente de permeabilidade das placas.....	79
Figura 27 — Valores da porosidade de cada traço confeccionado.....	80
Figura 28 — ACV: (a) consumo de energia e (b) água, (c) emissões de dióxido de carbono, CO ₂ , (d) emissões de óxidos de nitrogênio, NO _x , (e) material particulado, (f) emissão de dióxido de enxofre e (g) emissão de monóxido de carbono, de para os 3 concretos (100%AS, 100%AN e 50%AS-50%AN)	83
Figura 29 — ACV para os materiais lixiviados, chumbo (a) e mercúrio (b), resíduos perigosos na produção (c) e potencial de toxicidade humana, cancerígena (d) ou não cancerígena (e) de materiais e processos de equipamento quanto aos 3 concretos.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Valores do coeficiente de permeabilidade	28
Tabela 2 — Coeficiente de permeabilidade – determinação	29
Tabela 3 — Espessura mínima e resistência mecânica do revestimento permeável	29
Tabela 4 — Normas de referência para a realização dos ensaios de caracterização física e química do agregado natural e siderúrgico	56
Tabela 5 — Normas de referência para a realização dos ensaios de caracterização mecânica e hidráulica das misturas e corpos-de-prova com agregado natural e siderúrgico	59
Tabela 6 — Proporções dos traços e consumo de materiais utilizados	60
Tabela 7 — Porcentagens retidas dos agregados	71
Tabela 8 — Valores do MF, DMC e teor de material pulverulento dos agregados	71
Tabela 9 — Valores de massas específicas e de absorção de água dos agregados	72
Tabela 10 — Valores médios de massas unitárias solta e compactada	73

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ACI	<i>American Concrete Institute</i> / Instituto Americano de Concreto
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AOD	Descarbonetação por Oxigênio e Argônio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> / Sociedade Americana de Testes e Materiais
AF	Alto Forno
AS	Agregado siderúrgico
AN	Agregado Natural
BMP	<i>Best Management Practices</i> / Melhores práticas de gerenciamento
BSSF	<i>Baosteel's Slag Short Flow</i> /Fluxo Curto de Escória da Baosteel
BOF	<i>Basic Oxygen Furnace</i> / Forno Básico a Oxigênio ou Convertedor Básico a Oxigênio.
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CP	Cimento Portland
DMC	Diâmetro Máximo Característico
DRX	Difração de Raio X
EAFS	<i>Electric Arc Furnace Slag</i> / Escória de forno a arco elétrico
EPA	Agência de Proteção Ambiental
FRX	Fluorescência de Raio X
FAE	Forno Elétrico a Arco
GGBS	<i>Ground granulated blast furnace slag</i> / Escória de Alto-forno Granulada Moída
HTP-C	<i>Human Toxicity Potential for carcinogenic</i> / Potenciais de toxicidade humana cancerígena
HTP-NC	<i>Human Toxicity Potential for non-carcinogenic</i> / Potenciais de toxicidade humana NÃO cancerígena
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
IABr	Instituto Aço Brasil
K	Coeficiente de Permeabilidade
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil

LMS	Laboratório de Mecânica dos Solos
LD	Linz e Donawitz
LID	<i>Low Impact Development</i> /Desenvolvimento de Baixo Impacto
MF	Módulo de Finura
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PAG	Potencial de aquecimento global
RCRA	<i>Resource Conservation and Recovery Act</i> / Lei de Conservação e Recuperação de Recursos
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
OGFC	<i>Open-Graded Friction Course</i> / Curso de Atrito de Nível Aberto
UFC	Universidade Federal do Ceará
<i>Wordsteel</i>	<i>Wordsteel Association</i> / Associação Wordsteel.

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3	Óxido de Alumínio
Cl	Cloro
CaO	Óxido de Cálcio
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
Fe_2O_3	Óxido de Ferro
K	Condutividade Hidráulica
f_c	Resistência à Compressão
f_{ct}	Resistência à Tração na flexão
Hg	Mercúrio
SiO_2	Óxido de Silício
SO_3	Óxido sulfúrico
Mn	Manganês
NO_x	Óxido de nitrogênio
MgO	Óxido de magnésio
P_2O_5	Pentóxido de Fósforo
Pb	Chumbo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Questões da pesquisa	19
2. OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo geral.....	20
2.2 Objetivos específicos.....	20
3. REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1 Urbanização e Drenagem urbana sustentável.....	21
3.2 Pavimentos permeáveis	22
3.3 Aspectos Normativos	26
3.4 Estudos anteriores sobre pavimento permeável com inclusão de resíduos.....	30
3.5 Resíduos da Indústria siderúrgica	45
3.6 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	49
3.6.1 <i>Definição e etapas da ACV - NBR 14040/44 (ABNT, 2009).</i>	50
3.6.2 <i>Ferramentas de ACV</i>	50
4. MATERIAL E MÉTODOS	52
4.1 Coleta de materiais utilizados.....	52
4.1.1 <i>Agregado natural</i>	52
4.1.2 <i>Agregado siderúrgico</i>	53
4.2 Caracterização física, química e ambiental dos agregados naturais e siderúrgicos.....	54
4.3 Estudo da dosagem do concreto permeável	58
4.3.1 <i>Produção, preparo e moldagem dos corpos-de-prova</i>	60
4.3.2 <i>Consistência (abatimento de tronco de cone)</i>	63
4.3.3 <i>Execução das placas de concreto</i>	63
4.3.4 <i>Análise do coeficiente de permeabilidade da placa</i>	64
4.3.5 <i>Análise da porosidade da placa permeável</i>	65
4.3.6 <i>Ensaio de Resistência à compressão</i>	66
4.3.7 <i>Ensaio de Resistência à tração na flexão</i>	67
4.4 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	68
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
5.1 Caracterização física, química e ambiental dos agregados naturais e siderúrgicos.....	70
5.1.1 <i>Análise granulométrica</i>	70
5.1.2 <i>Massa específica e absorção de água do agregado natural e siderúrgico</i>	72

<i>5.1.3 Massa unitária solta e compactada dos agregados e volume de vazios</i>	73
<i>5.1.4 Fluorescência de Raio X (FRX) e Difração de Raio X (DRX)</i>	73
5.2 Caracterização mecânica e hidráulica das misturas	75
<i>5.2.1 Resistência à compressão</i>	75
<i>5.2.2 Resistência à tração na flexão</i>	77
<i>5.2.3 Coeficiente de Permeabilidade</i>	78
<i>5.2.4 Porosidade</i>	80
<i>5.3 Avaliação do Ciclo de Vida</i>	81
6. CONCLUSÃO	87
REFERÊNCIAS	90

1. INTRODUÇÃO

O avanço da urbanização e a expansão das infraestruturas viárias promovem a substituição de solos naturais por superfícies impermeáveis. Essa alteração compromete a capacidade de infiltração hídrica, agravando os desafios da drenagem urbana e intensificando os impactos ambientais, econômicos e sociais. Nesse contexto, soluções sustentáveis para a gestão de águas pluviais são demandadas, elevando a relevância do conceito de desenvolvimento de baixo impacto (Debnath; Sarkar, 2020).

Nesse sentido, o concreto permeável consolida-se como uma alternativa técnica e ambientalmente viável por proporcionar infiltração e purificação da água pluvial, além de contribuir para a atenuação do ruído do tráfego e mitigação do efeito da ilha de calor urbana (Nghopok *et al.*, 2018; Costa *et al.*, 2018).

Para aprimorar suas propriedades mecânicas e incorporar materiais sustentáveis como substituição aos agregados naturais (Vardaka *et al.*, 2014), a estratégia mais comum envolve o uso de aditivos, ligantes alternativos e agregados oriundos de resíduos (Kuo *et al.*, 2013). Essa abordagem torna o material mais econômico e ambientalmente viável (Ibrahim; Razak, 2016; Chen *et al.*, 2020). Diversos resíduos já foram investigados com esse fim, como: resíduos de construção civil (Lima *et al.*, 2025), fibra de aço ou vidro (Lee *et al.*, 2022), fibras de polipropileno (Pils *et al.*, 2019), escória de aciaria (Wang *et al.*, 2020) e escória de forno elétrico (Yeih *et al.*, 2015), clicker de óleo de palma (Ibrahim; Razak, 2016), borrachas de pneus (Gesoglu *et al.*, 2014), resíduos de vidro (Corso *et al.*, 2019), cinzas de carvão (Zaetang *et al.*, 2015), subprodutos de conchas (Nguyen *et al.*, 2013), entre outros (Tahiri *et al.*, 2022).

Dentre esses resíduos, destaca-se a escória de aciaria, um coproduto da indústria siderúrgica com propriedades físicas e mecânicas como resistência à abrasão e ao polimento (Skaf *et al.*, 2017), favoráveis à sua aplicação como agregado em pavimentos. A utilização de escórias como substitutos de agregados naturais tem potencial de reduzir a extração de recursos e reinserir resíduos na cadeia produtiva da construção civil, promovendo práticas circulares e sustentáveis (Vardaka *et al.*, 2014; Cartaxo *et al.*, 2023).

O Brasil, 9º maior produtor mundial de aço, gerou 33,7 milhões de toneladas em 2024, com produção específica de coprodutos e resíduos estimada em 662 kg/t de aço bruto (IABR, 2025). Nesse cenário, a valorização da escória como material de engenharia alinha-se à abordagem do Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID), diante da escassez de

agregados naturais e do acúmulo de resíduos industriais (Yeih; Chang, 2019; Ding *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2019).

Considerando que a indústria da construção civil consome cerca de 50% dos recursos naturais extraídos (John, 2000) e responde por 23% das emissões globais de dióxido de carbono CO₂ (Huang *et al.*, 2018), torna-se urgente o desenvolvimento de soluções que combinem eficiência técnica com redução de impactos ambientais. Nesse sentido, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) tem sido adotada como ferramenta metodológica para quantificar os impactos ambientais, energéticos e econômicos de produtos e processos da engenharia (Rebitzer *et al.*, 2004; Rehan *et al.*, 2018; Bhatt *et al.*, 2019; Lu *et al.*, 2019; Antunes *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020; Martins Vaz *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2020).

Dentre as ferramentas de ACV aplicadas a projetos de infraestrutura rodoviária, destaca-se o PaLATE, empregado com êxito para estimativa da pegada de carbono (Melanta *et al.*, 2013), apoio à tomada de decisão (Mauro *et al.*, 2016; Torres-Machi *et al.*, 2019), quantificação dos benefícios ambientais de materiais reciclados (Zhang *et al.*, 2011; Saeedzadeh *et al.*, 2018), classificação de rodovias sustentáveis (Lee *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2013) e comparação de técnicas de preservação de pavimentos (Gadsby *et al.*, 2020).

Diante da escassez de estudos integrados que avaliem, de forma combinada, o comportamento mecânico, hidráulico e ambiental de concretos permeáveis produzidos com agregado siderúrgico, esta pesquisa visa avaliar o comportamento mecânico-hidráulico e ambiental, via ACV, de concretos permeáveis com substituição parcial e total de agregados naturais por agregados siderúrgicos de escória de aciaria provenientes do processo *Baosteel's Slag Short Flow/ Fluxo Curto de Escória da Baosteel (BSSF)*.

1.1 Questões da pesquisa

Para o entendimento desse trabalho foram estabelecidas as seguintes questões de pesquisas acerca da temática estudada:

- I. Os resíduos industriais podem ser transformados em produtos viáveis em concreto permeável?
- II. Como a substituição parcial e total do agregado siderúrgico pode influenciar nas propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável?
- III. Até que ponto a inclusão de resíduos pode ser útil para a viabilidade ambiental de produtos de concreto?

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento mecânico-hidráulico e os impactos ambientais dos concretos permeáveis produzidos com agregado siderúrgico oriundo da escória de aciaria do processo *Baosteel's Slag Short Flow (BSSF)*, por meio de ensaios laboratoriais e da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar propriedades mecânicas (resistência à compressão e tração na flexão) dos concretos permeáveis com substituição parcial e total do agregado natural por siderúrgico, visando sua aplicação em pavimentos para tráfego de pedestre.
- Caracterizar o desempenho hidráulico do concreto permeável por meio da análise de sua condutividade hidráulica porosidade nas diferentes dosagens de substituição.
- Quantificar os impactos ambientais por meio de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), comparando as diferentes porcentagens de substituição do agregado siderúrgico com o concreto de referência (com agregado natural).
- Analisar o potencial de utilização de resíduos industriais, com ênfase no agregado siderúrgico, em pavimentos permeáveis, identificando alternativas de materiais que conciliem desempenho técnico e viabilidade ambiental.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo destina-se à revisão de literatura, nele são apresentados conceitos acerca de urbanização e drenagem urbana sustentável; são também abordadas pavimentos permeáveis, aspectos normativos e definições, pesquisas sobre estudos com concreto permeável e por fim Avaliação do Ciclo de Vida do agregado siderúrgico utilizado.

3.1 Urbanização e Drenagem urbana sustentável

O desenvolvimento intensivo das infraestruturas de transporte, por meio da construção de pavimentos convencionais, está convertendo o solo natural permeável em superfície impermeável, comprometendo sua capacidade de absorção (Volder *et al.*, 2009). A construção de sistemas convencionais de pavimentação impermeável resultou em duas alterações no ambiente local: (1) modificações nos aspectos hidrológicos e (2) variações no ambiente térmico ao redor (Yang; Jiang., 2003).

Segundo Tucci (1997), devido a urbanização, existem consequências indesejadas para o sistema de drenagem urbana, tais como: aumento das vazões máximas, dos volumes escoados, rebaixamento do lençol freático; aumento da produção de sedimentos devido à desproteção das superfícies e à produção de resíduos sólidos; a deterioração da qualidade da água, como consequência do carreamento de material sólido (principalmente na quadra chuvosa). Além disso, a drenagem urbana tem sido projetada com o objetivo de remover a água das precipitações o mais rapidamente possível, direcionando-a da área de montante para jusante, o que resulta no aumento da frequência e magnitude das enchentes. Estabelecendo o transporte de sedimentos, em que contribui para a degradação da qualidade da água (Araújo *et al.*, 2000; Marchioni, 2014).

Para atenuar a sobrecarga dos sistemas tradicionais de drenagem, tem-se buscado alternativas sustentáveis que controlam o elevado volume de escoamento superficial nas áreas urbanas. Nesse contexto, evidencia-se o conceito de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID - *Low Impact Development*), com o objetivo de potencializar a redução dos impactos da urbanização no manejo das águas pluviais urbanas. Essas práticas favorecem a infiltração, diminuem o escoamento superficial e promovem o aumento das reservas de água subterrâneas (Azevedo *et al.*, 2022).

O Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) surgiu na década de 80 como uma estratégia de manejo de águas por meio do emprego de planejamento multidisciplinar

integrado a práticas de tratamento e controle em pequena escala para minimizar o comportamento hidrológico natural (Souza; Cruz; Tucci, 2012). Para isso, adota-se como uma abordagem que simula os processos naturais da hidrologia, por meio de soluções paisagísticas de pequena escala, econômicas e aplicadas localmente. Essas soluções têm como objetivo absorver, reter, transportar e filtrar as águas pluviais no próprio local, segundo dados da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) (2009) e autores como Thiagarajan *et al.* (2018), Monk e Chalmers (2006).

O LID contribui também para a melhoria do ambiente urbano, promove a saúde pública, eleva a qualidade de vida das comunidades e ainda pode gerar economia para incorporadores e administrações públicas, ao reduzir os custos com infraestrutura urbana (Kim *et al.*, 2018; Newburn; Alberini, 2016; Church, 2015; Pak *et al.*, 2015).

Entre as principais medidas de controle local de águas pluviais, aplicando o conceito de LID, estão os sistemas de biorretenção, jardins de chuva, valas ajardinadas, telhados verdes, pavimentos porosos, entre outros. O pavimento permeável é caracterizado por possuir espaços vazios em sua estrutura e elevada condutividade hidráulica, o que permite a infiltração da água proveniente das precipitações. Dessa forma, contribui para a redução do escoamento superficial e diminui a sobrecarga nos sistemas de drenagem urbana (Gonçalves; Oliveira, 2014; Marchioni; Becciu, 2014; Oliveira, 2017).

3.2 Pavimentos permeáveis

O princípio geral do pavimento permeável é simplesmente coletar, tratar e infiltrar livremente qualquer escoamento superficial para dar suporte à recarga de águas subterrâneas, conforme estudos de Scholz e Grabowiecki (2007).

Para Weiss *et al.* (2015) e Balbo *et al.* (2017) os pavimentos permeáveis são utilizados como práticas de gerenciamento de água pluviais devido sua capacidade de infiltrar o escoamento. Dessa forma, o uso do pavimento é sugerido para praças, vias públicas de baixo volume de tráfego e calçadas, uma vez que pode servir como estratégia mitigadora para ilhas de calor, controle de alagamentos e combate à escassez hídrica (Balbo, 2020; Antunes *et al.*, 2020; Vaz, 2022).

Segundo ACI 522 R (2010), os pavimentos permeáveis também são utilizados para estacionamentos, camadas de drenagem rígidas sob áreas externas de shopping, pisos de estufas para manter o piso livre de água parada, aplicações de paredes estruturais onde características leves ou melhora de isolamento térmico, ou mesmo ambas, são necessárias,

pavimentos, paredes e pisos onde melhores características de absorção acústica são desejadas, etc.

De acordo com ABNT (2015), o pavimento permeável pode ser definido como:

"Tipo de pavimento que atende simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento e cuja estrutura permite a percolação e/ou o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura" (ABNT, 2015, p. 2).

Ao ser permitido que a água se infiltre em sua estrutura, trabalham para reduzir o volume de escoamento superficial e melhorar a qualidade de água. O uso dessa alternativa vem se tornando corriqueiro nos dias de hoje e necessário como medida compensatória para amortecer vazões de pico e atenuar efeitos causados pelas chuvas em áreas densamente urbanizadas (Chen *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2016; Chandrappa; Biligiri, 2016).

A relevância desse tipo de estrutura permeável está associada à sua capacidade de reduzir a demanda por sistemas de gestão de águas pluviais, o que pode diminuir os custos com instalações de drenagem dos pavimentos. Além disso, contribui de forma mais eficiente para a redução da impermeabilização do solo e, conseqüentemente, para a mitigação da ocorrência de enchentes nas áreas urbanas, conforme Batezini (2012).

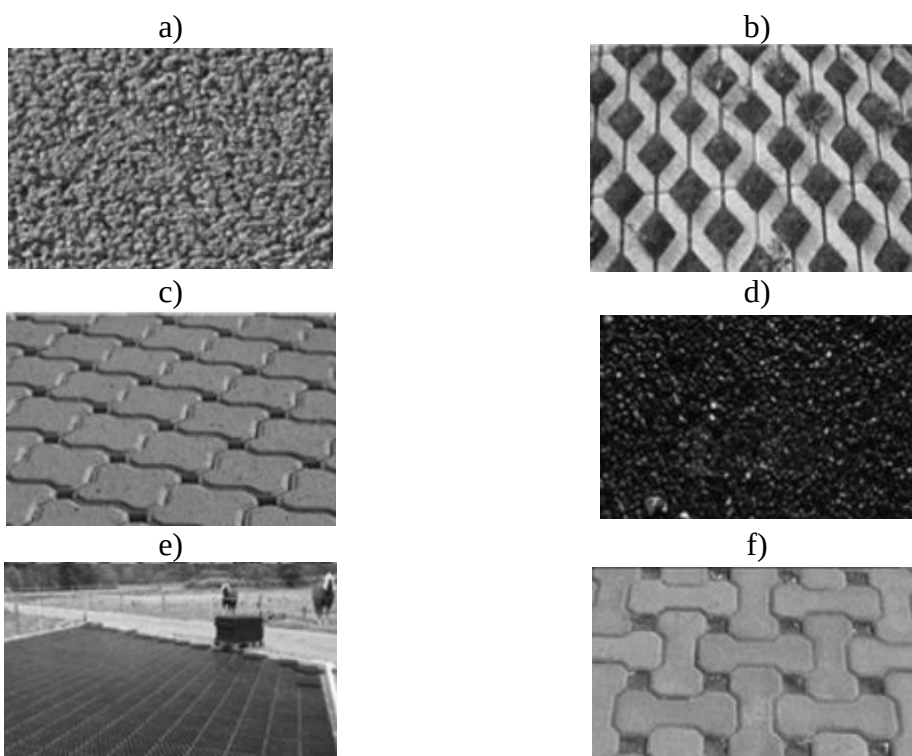
Ferguson (2005) dividiu o sistema de pavimento permeável (PPS) em duas categorias principais, como pavimento monolítico e modular. A estrutura monolítica entende-se por pavimento delimitado, a exemplo, concreto e asfalto poroso. As estruturas modulares incluem diferentes tipos de pavimentos (Figura 1).

O principal aspecto que cria uma diferença entre o pavimento normal e o pavimento permeável é o tamanho, a gradação e a quantidade de agregados. O principal requisito do concreto permeável é ter vazios substanciais para permear a água através de seus poros e para ter um poro de vácuo suficiente, a *American Concrete Institute* usou agregados de tamanho grande variando de 19 a 9,5 mm (ACI, 2010). No entanto, alguns pesquisadores usaram agregados menores de tamanhos de 2,36 mm a 9,5 mm para aumentar a resistência do concreto (Kevern *et al.*, 2009a; Deo *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2010; Nguyen *et al.*, 2014).

Segundo Huang *et al.* (2010), o concreto poroso é um tipo único de pavimento de concreto composto principalmente por agregado natural racionalmente graduado e materiais cimentantes que fornecem à mistura uma estrutura interna de macroporos interconectada. A quantidade limitada em concreto poroso com poros curvilíneos que ajudam a armazenar

águas pluviais dentro deles, e reduzir a quantidade de escoamento superficial de forma científica.

Figura 1 — Diferentes tipos de sistema de pavimento permeável, como agregado poroso (a), concregrama porosa (b), blocos de pavimentação com juntas abertas (c), asfalto poroso (d), geocélulas de plástico (e), pavimentadores de grades de concreto (f)



Fonte: Debnath; Sarkar (2020).

O concreto permeável foi usado pela primeira vez em 1852 e patenteado em 1980, mas ganhou popularidade em todo o mundo em 1923, devido ao seu menor custo em comparação ao concreto tradicional (Ghafoori; Dutta, 1995; MaawalI *et al.*, 2017). Embora não seja uma tecnologia nova, o concreto permeável está recebendo interesse renovado atualmente.

Conforme Putman (2016), o concreto permeável se tornou popular nos Estados Unidos na década de 1980. Quando ganhou popularidade nos EUA, foi utilizado em aplicações de pavimentação como solução de gerenciamento de águas pluviais até então para os estudos em questão.

Dessa forma, a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) reconheceu o concreto permeável como uma das melhores práticas de gestão (BMPs) para o controle da

poluição proveniente da primeira descarga, a redução de poluentes no escoamento pós-construção e a gestão de águas pluviais (Obla, 2010; Meddah *et al.*, 2019).

Para Kazi (2023), o concreto permeável apresenta alta permeabilidade, o que o torna um material ideal para a melhoria do ambiente urbano. Entre suas vantagens estão a baixa densidade, a diminuição da poluição das águas subterrâneas e a redução do acúmulo de água na superfície. Esses benefícios podem ser resumidos nos seguintes pontos: (1) a água da chuva infiltra-se rapidamente no solo, promovendo a recarga dos recursos hídricos subterrâneos e, conseqüentemente, elevando o nível do lençol freático; (2) O solo abaixo pode ser mantido úmido, pois o pavimento é permeável. Isso melhorará a superfície da estrada; (3) O pavimento com concreto permeável tem a capacidade de absorver ruídos de veículos em movimento, resultando em um ambiente calmo e agradável; (4) Os poros conectados no pavimento de concreto permeável podem reter calor e regular a temperatura e a umidade da superfície da terra, como resultado, ele ajuda a reduzir o efeito de ilha de calor urbana.

Já o asfalto poroso possui uma composição parecida com a convencional, também derivada do petróleo é um tipo de revestimento que pode ser usado em obras de vias. Possui espaços vazios em sua estrutura. Em razão dos vazios existentes em sua estrutura, o material torna-se permeável, possibilitando a infiltração da água (Pinheiro, 2025).

Pinheiro (2025) destaca que o sistema de asfalto poroso é composto por uma camada de revestimento asfáltico, sobre a qual é colocada uma camada espessa de material altamente poroso, geralmente com brita fina. Um tubo perfurado é instalado para permitir que a água se infiltre pelas camadas entre os dutos e seja direcionada para o local apropriado, que pode ser um curso d'água natural (mais comum) ou um sistema de armazenamento de água.

Conforme indicado por Acioli (2005), o piso intertravado pode ser vazado ou sólido. Os blocos vazados intertravados de concreto possuem aberturas em sua estrutura, permitindo a infiltração de água para o reservatório subterrâneo. A instalação dos blocos é feita da mesma forma que os intertravados convencionais. As aberturas podem ser preenchidas com materiais como areia, cascalho ou grama.

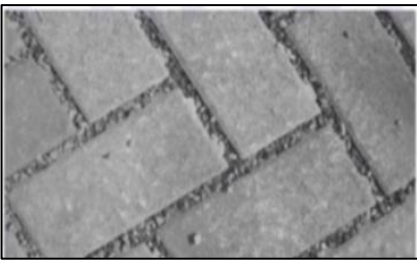
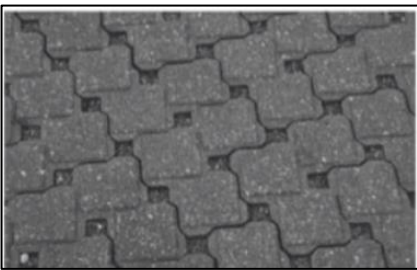
Por fim, os blocos de concreto pré-fabricados são amplamente recomendados para calçadas, passagens de veículos e recuos de jardins. A camada de assentamento deve ser de areia, embora também seja possível utilizá-los sobre argamassa. Os blocos se intertravam por contenção lateral e atrito, e entre as peças, pode ser colocado material vegetal ou um rejunte especial, permitindo a utilização imediata do pavimento (Acioli, 2005).

3.3 Aspectos Normativos

Diante do crescente interesse e das pesquisas sobre pavimentação permeável, foi publicada, em 2015, a NBR 16.416 (ABNT, 2015). Esta norma estabelece os requisitos e procedimentos mínimos exigidos para o projeto, especificação, execução, distribuição granulométrica recomendada, amostragem para ensaio de campo, coeficiente de permeabilidade, resistências mecânicas e manutenção de pavimentos permeáveis, com revestimentos de peças de concreto intertravadas, concreto moldados no local e placas de concreto.

A NBR 16.416 (ABNT, 2015) estabelece especificações e métodos de ensaio para as diferentes camadas do pavimento permeável, incluindo base, sub-base e camada de assentamento. Além disso, a norma aborda os materiais utilizados nas juntas e no revestimento. Também trata de aspectos relacionados à execução, manutenção e limpeza dos pavimentos permeáveis de concreto, fornecendo requisitos e diretrizes que devem ser seguidos para garantir que esses procedimentos sejam realizados de maneira adequada. Classifica os tipos de revestimentos permeáveis, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 — Tipologia de revestimentos de pavimento intertravado permeáveis, segundo NBR 16.416 (ABNT, 2015)

Revestimento de Peças de concreto com juntas alargadas.	
Revestimento de Peças de concreto com áreas vazadas.	
Revestimento de Peças de concreto permeável.	

Revestimento de pavimento de placas de concreto permeável.

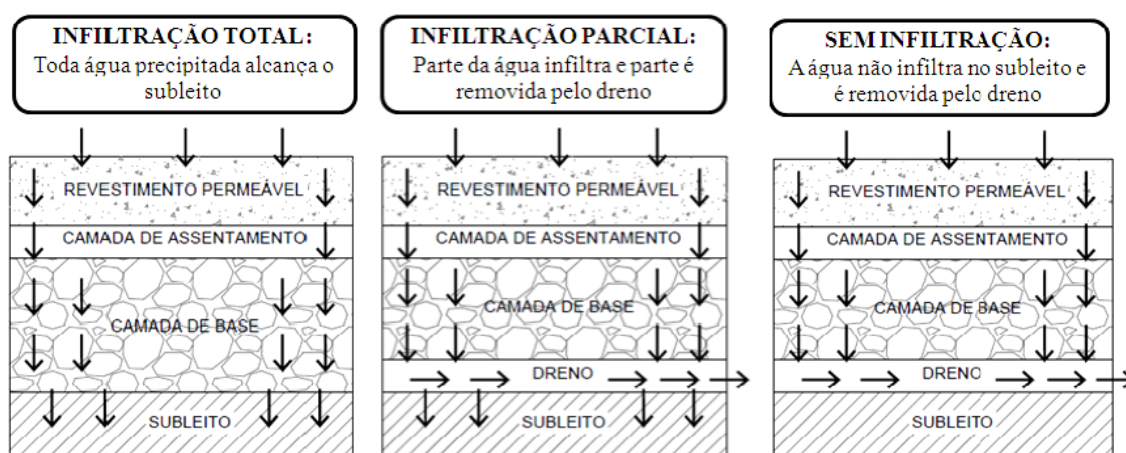
Pavimento revestido com concreto permeável moldado *in loco*.



Fonte: Elaborado com base em NBR 16.416 (ABNT, 2015).

Segundo a ABNT (2015), os pavimentos permeáveis podem ser classificados em três categorias diferentes, com base no sistema de infiltração da água devido a precipitação: pavimentos com infiltração total, com infiltração parcial e sem infiltração (Figura 3). A escolha do sistema de infiltração depende das características do solo ou de fatores específicos do projeto.

Figura 3 — Sistemas de infiltração do pavimento permeável com base em ABNT (2015)



Fonte: Lima (2020).

Na Figura 3 o primeiro pavimento é o de infiltração total. Neste sistema, toda a água que incide sobre o pavimento é absorvida pelas juntas ou espaços vazios do revestimento, atravessa as camadas subjacentes e alcança o solo (ABNT, 2015).

O segundo pavimento da Figura 3 é o de infiltração parcial. Semelhante ao sistema anterior, em chuvas de intensidade normal, a água penetra no pavimento e infiltra-se até o solo subjacente. No entanto, uma parte da água é direcionada para o dreno (ABNT, 2015).

Por fim, existe também o sistema de pavimento permeável sem infiltração (Figura 3). Neste caso, a água da chuva é totalmente captada por meio da aplicação de uma membrana impermeável e flexível, colocada sobre o solo e envolvendo a camada de sub-base, criando assim uma zona de armazenamento semelhante a um reservatório.

De acordo com a ABNT (2015), os solos podem ser classificados como de baixa, média ou alta permeabilidade, conforme apresentado na Tabela 1, que estabelece a relação entre a condutividade hidráulica e o grau de permeabilidade do solo.

Tabela 1 — Valores do coeficiente de permeabilidade

Condutividade hidráulica do solo K		Grau de permeabilidade do solo
m/s	mm/h	
$>10^{-3}$	>3600	Alta
10^{-3} a 10^{-5}	3600 a > 36	Média
10^{-5} a 10^{-7}	36 a $> 0,36$	Baixa
10^{-7} a 10^{-9}	0,36 a 0,0036	Muito baixa
$<10^{-9}$	$<0,0036$	Praticamente impermeável

Fonte: ABNT (2015).

Observa-se que um solo com condutividade hidráulica superior a 10^{-3} m/s é considerado de alta permeabilidade, enquanto um solo com condutividade hidráulica inferior a 10^{-9} m/s é classificado como praticamente impermeável.

De acordo com a ABNT (2015), o pavimento permeável deve apresentar, quando recém-construído, um coeficiente de permeabilidade superior a 10^{-3} m/s. Essa exigência deve ser avaliada em campo após a execução do pavimento, utilizando o método descrito no Anexo A da NBR 16.416. A Tabela 2 especifica o método a ser empregado para determinar o coeficiente de permeabilidade, dependendo do tipo de revestimento permeável.

Tabela 2 — Coeficiente de permeabilidade – determinação

Tipo de revestimento	Método de ensaio		Coeficiente de permeabilidade do pavimento recém-construído m/s
	Local de avaliação		
	Em laboratório	Em campo	
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Anexo A de NBR 16.416 (ABNT, 2015)		
Peça de concreto permeável	NBR 13292 (ABNT, 2021) ou	Anexo A de NBR 16.416 (ABNT, 2015)	>10 ⁻³
Placa de concreto permeável	Anexo A de NBR 16.416 (ABNT, 2015)		
Concreto permeável moldado <i>in loco</i>			
Fonte: ABNT (2015).			

O projeto de um pavimento permeável deve levar em conta o tipo de uso e o local de implementação. A definição dos materiais e das espessuras das camadas a serem executadas deve atender simultaneamente aos dimensionamentos mecânico e hidráulico (ABNT, 2015). No dimensionamento da camada de revestimento, o projeto deve, no mínimo, cumprir os valores especificados na Tabela 3.

Nota-se que a resistência mecânica esperada para cada tipo de pavimento permeável de concreto é associada ao tipo de solicitação e à respectiva espessura, além da norma que regulamenta o ensaio a ser realizado para a análise da resistência mecânica.

Tabela 3 — Espessura mínima e resistência mecânica do revestimento permeável

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica (MPa)	Método de ensaio
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60	$\geq 35,0$	NBR 9781 (ABNT, 2013)
	Tráfego leve	80		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	$\geq 20,0$	NBR 15805 (ABNT, 2015)
	Tráfego leve	80		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	$\geq 2,0$	NBR 12142 (ABNT, 2010)
	Tráfego leve	80		
Concreto permeável moldado <i>in loco</i>	Tráfego de pedestres	60	$\geq 1,0$	NBR 12142 (ABNT, 2010)
	Tráfego leve	100	$\geq 2,0$	

Fonte: ABNT (2015).

3.4 Estudos anteriores sobre pavimento permeável com inclusão de resíduos

3.4.1. Revisão Bibliométrica

As fases metodológicas empregadas na revisão são apresentadas na Figura 4. Para auxiliar na organização da seleção e dos resultados obtidos foi utilizado as ferramentas acadêmicas, *bibliometrix* a partir da instalação do *software Rstudio*, em que foi abordada uma técnica de pesquisa que aplica métodos quantitativos e estatísticos para analisar a produção científica em uma determinada área de conhecimento e *Mybib* empregada para organização de referências bibliográficas e opções normativas.

Figura 4 — Fases metodológicas



Fonte: Autora (2025).

A etapa de identificação dos trabalhos ocorreu de agosto de 2024 a fevereiro de 2025, nas bases de dados do Portal de Periódicos da Capes, *Scopus* e *Web of Science*, selecionados devido suas abrangências e relevâncias para o tema de estudo, adotando-se as palavras chaves, "*pervious concrete*" ou "*porous concrete*" ou "*permeable concrete*" e "*steel slag*".

Na base de dados pesquisada, foram encontradas 289 publicações nos últimos 11 anos. Dessas, 96 foram selecionados a partir da *Web of Science* e *Scopus*. Após a remoção dos artigos duplicados com o auxílio do aplicativo *web Rayyan*, 20 artigos foram escolhidos para servir como base para esta pesquisa.

A Figura 5 apresenta os resultados dos 289 artigos do levantamento inicial, incluindo o número de artigos acadêmicos publicados, tanto nacionais quanto internacionais, além dos países de origem das publicações. Os dados revelam a distribuição das publicações por país, destacando claramente o domínio da China com 148 artigos publicados e a Malásia com 22 artigos referente a pesquisa sobre concreto permeável. As demais publicações estão distribuídas de forma equilibrada entre países da América Latina, Europa e Ásia.

siderúrgico *BSSF* e outros resíduos na produção de concreto permeável. No Quadro 1, estão resumidos os estudos analisados ao longo dos artigos.

Pimentel *et al.* (2023) investigaram a relação entre a forma do agregado, a resistência mecânica e a permeabilidade de lajes de concreto permeável contendo escória de aço. O método de Processamento Digital de Imagem (DIP) foi utilizado para medir as propriedades geométricas dos agregados. Foram avaliadas três misturas diferentes, com três tipos de agregados graúdos (brita 12,5 mm, brita 9,5 mm e escória de aço grossa), além de um tipo de agregado fino (escória fina). Além disso, coeficientes de resistência à flexão, fluxo e permeabilidade foram obtidos nas lajes. Os resultados mostraram o potencial do uso de escória de aciaria, com resultados de resistência à flexão mais elevados (4,61 MPa) e os autores constataram que a relação entre os parâmetros de forma do agregado e as propriedades da laje foi influenciada por agregados mais polidos, mais angulares e mais esféricos, os quais resultaram em maiores valores de resistência à flexão e menor coeficiente de permeabilidade.

Sandoval *et al.* (2019) avaliaram o uso da escória de alto forno (FEA) em substituição ao agregado graúdo convencional na fabricação do concreto permeável. Foram escolhidos três FEA's com granulometria de 6-10 mm (A), 10-20 mm (B) e 30% da (A)-70% da (B) - (C). Verificaram também a influência do agregado miúdo (4,8 mm). Além da análise do comportamento mecânico, em que foram realizados ensaios de compressão, tração na flexão, avaliação de comportamento hidráulico, índice de vazios e permeabilidade à carga constante. Como resultados obtidos a resistência à compressão e à flexão, em que variou entre 19 e 31 MPa e 3 a 4 MPa, respectivamente. Índice de vazios variando de 15% a 20% e coeficiente de permeabilidade de 10 – 12 mm/s para os agregados graúdos.

Mikami *et al.* (2018) investigaram a influência da composição dos agregados reciclados da construção civil nas propriedades do concreto poroso, como resistência à compressão axial, coeficiente de permeabilidade, índice de vazios, absorção de água e massas específicas real e aparente. O estudo analisou diferentes proporções de cerâmica vermelha (10%, 25%, 50% e 100%), obtidas pela mistura de resíduos de construção e demolição (contendo cerâmica de 2,92%) e resíduos de blocos cerâmicos. Quanto a permeabilidade os concretos permeáveis variaram entre 0,82 e 0,95 cm/s, sendo que o aumento da proporção de cerâmica vermelha reduziu o coeficiente de permeabilidade. Em relação a resistência axial, do concreto sem cerâmica, foi a mais alta, alcançando 10,15 MPa, enquanto os concretos com cerâmica apresentaram resistência abaixo de 3,00 MPa. Por fim, o volume de vazios permaneceu constante, variando entre 32,13% e 37,33%. Verificaram

ainda que a resistência aumentou com a elevação da massa específica aparente, enquanto o coeficiente de permeabilidade diminuiu nos concretos com maior absorção de água.

Tavares *et al.* (2016) avaliaram a eficiência de concretos permeáveis com base nos parâmetros de coeficiente de permeabilidade, consistência, resistência e condições de interfaces para três traços de concreto, 100% agregado natural; 50% agregado natural e 50% agregado reciclado; 100% agregado reciclado. Nos três traços de concreto com agregado reciclado foram adicionadas fibras de vidro (curta - 12mm e longa - 24mm), com intenção de melhorar as propriedades mecânicas do compósito. Os resultados obtidos foram satisfatórios, especialmente em relação à resistência, em que, todos os valores obtidos de resistência a compressão aos 28 dias de idade atenderam a faixa de resistência de concretos permeáveis especificada na norma ACI 522R (2010), que variou entre 2,8 e 28 MPa e o coeficiente de permeabilidade (superiores a 10^{-4} m/s) em todos os concretos ensaiados quando comparados aos concretos com agregados naturais, demonstrando o potencial de uso dos agregados reciclados.

Simões *et al.* (2023) produziram concreto permeável no formato de blocos intertravados (pavers), com a inserção de teores de 0%, 5%, 10% e 15% de resíduos de beneficiamento da etapa de corte de rochas ornamentais graníticas, em substituição (em volume) ao cimento Portland. Realizaram então, ensaios de permeabilidade, porosidade e resistência mecânica, de acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015). Concluíram que para os resultados de resistência mecânica, as peças com substituição de 5% e 10% de resíduos alcançaram a resistência (f_{ck}) mínima, enquanto o paver com 15% de substituição de cimento de Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais não obteve um resultado satisfatório. Já os resultados de porosidade e permeabilidade foram satisfatórios para todos os teores de resíduos, com resultados acima de 16,6% e 5.000 mm/h, respectivamente, para as misturas testadas.

Cartaxo *et al.* (2023) o estudo investigou as propriedades mecânicas de concretos produzidos com a incorporação de agregados de escória de aciaria *BSSF*. Para isso, foram elaborados traços correspondentes à classe de agressividade ambiental II, com resistência mínima de 25 MPa aos 28 dias. Ao todo, desenvolveram-se cinco traços de concreto, variando os teores de substituição dos agregados naturais pela escória em 0% (referência), 20%, 40%, 60% e 80%, em volume. Foram avaliadas, no estado fresco, a consistência, a massa específica e o teor de ar incorporado; e, no estado endurecido, a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade estático, nas idades de 7, 28 e 91 dias. Os resultados indicaram que os concretos com adição de escória de aciaria *BSSF* apresentaram

desempenho mecânico superior ao traço de referência, exceto para o teor de 80% nas idades iniciais. Destaca-se, ainda, que o traço com 60% de escória obteve os ganhos mais expressivos nas propriedades mecânicas entre os estudados.

Pils *et al.* (2019) estudaram características do concreto drenante, nas propriedades mecânicas (resistência à tração, à compressão; à tração na flexão) e coeficiente de permeabilidade, através do desenvolvimento de oito traços, foram produzidos cinco traços de concreto drenante contendo agregados mais finos, contrastados com o traço de referência, no qual esses agregados não foram incorporados. Sendo divididos em traço A (cimento e brita) e outros 4 traços (B, C, D, E) com a adição de brita 0 e areia. Posteriormente, após ter como referência o traço D, estudaram três traços com a inclusão de 1, 2 e 3 kg/m³ com a incorporação de fibras de polipropileno no concreto drenante, com o objetivo de analisar os efeitos dessa adição em suas propriedades. Os resultados indicaram que a presença das fibras modificou as características do material, proporcionando maiores resistências sem comprometer a permeabilidade dos traços. Observou-se, ainda, uma melhoria significativa na resistência à tração na flexão — propriedade essencial para aplicação em pavimentos —, o que demonstra o potencial de utilização do concreto drenante reforçado com fibras. de fibras de polipropileno, com o objetivo de analisar os efeitos que a adição de fibras causa nas propriedades do concreto drenante. Concluíram então, que a presença das fibras alterou as características do concreto, levando o mesmo a atingir maiores resistências, aliadas a uma boa permeabilidade em seus traços, verificando-se assim a melhoria de capacidade de resistência à tração na flexão do concreto drenante, principal propriedade para uso em pavimentos, sem prejudicar a permeabilidade e avaliando a possibilidade de aplicação dele.

Yavuz (2024) investigou a usabilidade de agregados reciclados na produção de concreto permeável. Na pesquisa, o agregado natural foi substituído por agregado de concreto reciclado em proporções de peso de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Foram analisadas as resistências à compressão, flexão, tração por fissuração, coeficiente de permeabilidade, porosidade e resistência ao congelamento-degelo. Verificaram também, a microestrutura antes e depois do efeito de congelamento-degelo, usando microscopia eletrônica de varredura. Por fim, os resultados mostraram que os agregados reciclados aumentaram o coeficiente de permeabilidade e a porosidade, mas afetaram negativamente as propriedades mecânicas.

Vardaka *et al.* (2014) abordaram a adição da escória de aço como substituto para agregados graúdos em confecção de concreto permeável. Especificamente, três tipos de agregados foram usados: escória de aço, resíduos de construção e demolição e agregados

calcários convencionais. Comparados quanto às propriedades mecânicas (resistência à compressão e comportamento à abrasão) e permeabilidade à água. Analisaram também a porosidade dos projetos de mistura de concreto permeável usando perfis de porosidade produzidos por varredura de Tomografia Computadorizada de raios X e observou-se que a incorporação de subprodutos da indústria ou de resíduos de construção e demolição, levou um melhor comportamento à abrasão e ao aumento, em alguns casos, da resistência à compressão e da permeabilidade à água.

Patil *et al.* (2022) adicionaram diferentes proporções de resíduos de garrafas PET, cortados em pequenos fios, nas quantidades de 0%, 1%, 1,5% e 2%, após a mistura da fibra plástica. Sendo objetivo da pesquisa pelos autores, melhorar a resistência à compressão e realizar testes de permeabilidade em blocos de concreto permeável. Os resultados de porosidade foram satisfatórios para todos os teores de porcentagens de resíduos, com resultados variando de 23,8% e 34,4%. Para a resistência à compressão observou-se após adição de fibra plástica e cura após 28 dias, alterando entre 8,71 MPa e 23,11 MPa para as misturas testadas.

Mehmet *et al.* (2014) produziram concreto permeável utilizando três tipos de resíduos da borracha (pneu triturado, em lasca e granulada fina) em substituição parcial de 0%, 5%, 10% e 20%, ao agregado convencional, e avaliaram propriedades mecânicas (resistência à compressão e à tração por fissuração), módulo de elasticidade, permeabilidade à água e energia de fratura. As borrachas residuais foram usadas com três tamanhos de partículas diferentes (muito fino, fino e grosso). Embora no estudo em questão, o uso da borracha tenha prejudicado significativamente as propriedades mecânicas do concreto permeável, a substituição do agregado natural por partículas de borracha resultou em um aumento significativo da tenacidade e ductilidade do material, além de melhorar sua capacidade de amortecimento.

Shen *et al.* (2020) desenvolveram um concreto permeável utilizando pó de escória de aço moída e carbonatada como material ligante, e escória de aço britada como agregado. Em que realizaram estudos experimentais sobre as propriedades da matriz de consolidação carbonizada de escória de aço em diferentes granulometrias de agregados de aço. Sendo dividida em (A) 95% dos grãos entre a faixa de 9,5 a 16 mm e 5% (B) na faixa de 4,75 a 9,5 mm para a produção de 7 traços de concreto permeável e substituição pó de escória de aço em 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, 15%, 30%, 40%, 50% e 70% por fosfogesso, para melhorar as propriedades de hidratação. Os resultados da pesquisa demonstraram que o fosfogesso acelerou o processo de carbonização da escória de aço. Quando o teor de

fosfogesso foi de 2,5%, a resistência e a taxa de carbonização da escória, obtida por meio de prensagem, alcançaram 82,6 MPa e 52,1%, respectivamente. Para a resistência atingiram 9,4 MPa e porosidade mais de 20%. Além disso, houve uma redução de 75,8% no custo dos materiais, com 100% de utilização de resíduos sólidos e a absorção de aproximadamente 100 kg/m³ de CO₂, comparado com o concreto permeável comum, o concreto permeável de escória de aço carbonatada.

Meddah *et al.* (2019) realizaram a substituição parcial do agregado natural por frações específicas de agregados reciclados provenientes de diferentes materiais, como borracha, concha triturada, vidro triturado, plástico triturado e ferrocromo para a produção de concreto permeável. Observaram uma redução na densidade do concreto permeável devido às diferenças na forma e gravidade específica dos agregados reciclados em comparação com o agregado natural. No entanto, não houve alterações significativas no teor de vazios. O concreto permeável incorporando borracha apresentou a menor densidade e porosidade (1700 kg/m³ e 27,6%, respectivamente), devido à sua baixa gravidade específica e capacidade de preencher vazios, enquanto o concreto produzido com agregados naturais retidos em uma peneira de 5 mm obteve a maior porosidade (32,6%) e uma densidade média de 1735 kg/m³. As propriedades médias de endurecimento dos concretos permeáveis aos 28 dias foram analisadas também e não houve variação significativa na densidade dos concretos com diferentes tipos de agregados. A menor densidade foi obtida com a inclusão de 10% de agregado de borracha triturada. A resistência à compressão e à flexão foi significativamente influenciada pela substituição parcial do agregado natural por materiais reciclados, com ambas as propriedades diminuindo à medida que o conteúdo de agregado reciclado aumentava. O concreto permeável emborrachado apresentou a menor resistência à compressão (1,9 MPa), enquanto o agregado de vidro apresentou a maior resistência (10,4 MPa) em comparação com outros materiais reciclados. Em contraste, o menor valor de resistência à flexão foi registrado com o concreto permeável de agregado de concha (cerca de 1,5 MPa) e o maior foi no concreto permeável de agregado de vidro (2,6 MPa).

Lang *et al.* (2019) pesquisaram a influência da escória de aço e do cimento de fosfato de magnésio nas características do concreto permeável, variando o tamanho das partículas e os métodos de moldagem. Foram utilizados três tamanhos diferentes de partículas: finas (FP) (2,5 – 5,0 mm), médias (MP) (5 – 10 mm) e grossas (CP) (10 – 15 mm). Além disso, três métodos de moldagem foram aplicados no processo de produção do concreto permeável: moldagem por vibração, moldagem por compactação e moldagem hidrostática. Os resultados mostraram que a porosidade da mistura de cimento de fosfato de magnésio

(MSPC) variou entre 23,8% e 26,5%, enquanto a taxa de infiltração de água dos concretos permeáveis ficou entre 5,85 e 7,10 mm/s. Os maiores valores de porosidade e permeabilidade foram observados nas misturas com agregados graúdos. O estudo também revelou que o tipo de moldagem teve um efeito insignificante na porosidade e permeabilidade do concreto, embora os espécimes moldados pelo método de compactação apresentassem valores ligeiramente superiores em comparação com os outros métodos.

Wang *et al.* (2020) averiguaram o impacto do uso de escória de aço misturada com agregado natural em diversas propriedades do concreto permeável, incluindo resistência e durabilidade. Em que, foram utilizados agregados naturais (NA) e escória de aço (SS) com tamanhos variando de 5 mm a 15 mm, além de uma quantidade muito pequena de agregado fino. As porcentagens de substituição do agregado natural por escória de aço foram 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Os resultados indicaram que o aumento da quantidade de escória de aço nas misturas de concreto permeável elevou a porosidade e a permeabilidade à água (taxa de infiltração). A adição de escória de aço mostrou um efeito positivo também nas propriedades de resistência, com o aumento da quantidade desse agregado também elevando as características de resistência mecânica do concreto permeável. No entanto, a densidade aparente das misturas aumentou à medida que a proporção de escória de aço aumentou, fenômeno atribuído ao formato irregular e às bordas afiadas do agregado SS, produzido pela britagem da escória de aço. Por fim, as misturas com 100% de escória de aço apresentaram a maior porosidade. A permeabilidade foi maior quando a substituição foi de 75% a 100%, com valores em torno de 13 mm/s. A resistência à compressão do concreto permeável com 100% de escória de aço foi de 17,6 MPa, 34,4% superior à do concreto permeável de controle, que apresentou 13,1 MPa.

Shen *et al.* (2013) verificaram o impacto da utilização de agregados de polímero-borracha em concreto permeável, desenvolvido como material para camada de atrito de pavimento. Foram analisadas diversas propriedades mecânicas, como resistência, comportamento tensão-deformação, resistência à abrasão, resistência ao impacto e microestrutura do material. Na pesquisa, o concreto foi denominado: concreto poroso modificado com polímero sem adição de agregados de borracha (PMPC-0); concreto poroso modificado com polímero, no qual diferentes volumes de agregados graúdos foram substituídos por borracha (PMPC-1); e o concreto poroso modificado com polímero, onde diferentes volumes de agregados finos foram substituídos por agregados de borracha (PMPC-2). A substituição de agregados de borracha em PMPC-2 seguiu a proporção ótima de 18%, com valores de substituição variando de 0% a 30% (0%, 5%, 10%, 14%, 18%, 22%

e 30%) nas séries de testes de PMPC-1 e PMPC-2. Os resultados mostraram que o concreto com borracha teve maior resistência à flexão e compressão em comparação com o concreto poroso modificado com polímero comum e agregado mineral. Além disso, a capacidade de absorção de energia do concreto poroso foi aprimorada com os agregados de borracha, o que resultou em melhorias significativas na ductilidade, resistência à abrasão e resistência ao impacto. A porosidade e a permeabilidade do material atenderam aos requisitos do OGFC (*Open-Graded Friction Course*/ Curso de atrito de nível aberto). A análise realizada por microscopia eletrônica de varredura demonstrou que a zona de transição entre a borracha e a pasta de cimento foi reforçada pelo polímero, e a intercalação de filmes de polímero nos produtos de hidratação do cimento aumentou a ductilidade e flexibilidade do material. Por fim, os resultados mostraram que, ao substituir 14% do agregado de pedra natural por borracha polimérica, as resistências à compressão e à flexão foram de 17,5 MPa e 6 MPa, respectivamente, enquanto a porosidade e a permeabilidade ficaram acima de 18% e 1,16 mm/s, respectivamente.

Ibrahim (2016) investigaram a utilização do clínquer de óleo de palma como agregado grosso na produção de concreto permeável. Diferentes proporções de substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do agregado natural pelo clínquer foram testadas, com partículas de tamanho variando entre 4,75 mm e 9,5 mm e uma proporção constante de água/cimento (a/c) de 0,3. Os resultados do estudo mostraram que, após 28 dias de cura, a densidade do concreto permeável com clínquer de óleo de palma variou entre 1.238 e 1.717 kg/m³, sendo influenciada pela proporção de substituição; à medida que essa proporção aumentava, a densidade seca do concreto diminuía. A porosidade variou de 23,9% a 35,18%, apresentando aumento conforme a quantidade de clínquer de óleo de palma substituída o agregado natural. A permeabilidade foi observada entre 46,1 mm/s e 83,3 mm/s, dependendo da proporção de substituição do agregado natural pelo clínquer de óleo de palma. O concreto permeável com agregado de pedra natural apresentou resistência à compressão de 10 MPa, enquanto os concretos com 25% e 50% de clínquer de óleo de palma apresentaram resistências de 6,7 MPa e 6,6 MPa, respectivamente. O concreto permeável feito com 100% de clínquer teve a menor resistência à compressão, de 3,43 MPa, resultado do alto teor de vazios e da textura áspera e escamosa do agregado de clínquer de óleo de palma.

Lee *et al.* (2022) buscaram reforçar concretos permeáveis de resistência normal e alta, com fibras de aço (1% e 2%) ou fibra de vidro (0,25% e 0,5%), que foram submetidos a testes de permeabilidade à água, porosidade, resistência à compressão, resistência à flexão, módulo de elasticidade e tenacidade. Na pesquisa, os resultados demonstraram que, tanto no

concreto permeável de alta resistência quanto no concreto permeável comum com adição de fibras de aço, houve aumento da porosidade e do coeficiente de permeabilidade em comparação com o grupo controle. O coeficiente de permeabilidade dos concretos permeáveis reforçados com fibras de alta resistência e dois tamanhos de agregados atende aos requisitos da especificação ACI para concreto estrutural. Além disso, o concreto permeável de alta resistência H1-S2 (com 2% de fibra de aço) apresentou a maior resistência à compressão, de 52,8 MPa, aos 28 dias. A resistência à flexão do concreto permeável também aumentou com o tempo, mas no caso do concreto reforçado com fibras, essa tendência não se manteve devido à grande variação no controle de qualidade das diferentes misturas de fibras. Contudo, tanto as fibras de aço quanto as de vidro proporcionaram uma certa melhoria na tenacidade à flexão, sendo esse efeito mais significativo com a fibra de aço. Após atingir o valor máximo de resistência à flexão, ainda restava cerca de 30% da capacidade de suporte, que diminuía gradualmente até a completa ruptura do material.

Chan Chai *et al.* (2018) examinaram o impacto do nível de substituição do agregado natural (agregado de calcário britado, LS) por concreto reciclado (RC) e agregados de cinzas de carvão (BA) nas propriedades do concreto permeável. Aos quais, foram avaliadas as propriedades mecânicas, a condutividade térmica e a absorção sonora. Os resultados indicaram que a resistência à compressão do concreto permeável com BA foi excelente, sendo comparável à do concreto permeável com LS. Por outro lado, a resistência à compressão do concreto permeável com RC apresentou uma leve redução, variando entre 85% e 99% da resistência do concreto permeável com LS. A condutividade térmica e a absorção sonora dos concretos permeáveis com RC e BA foram significativamente melhoradas quando comparadas às do concreto permeável convencional com LS.

Toghrolí *et al.* (2020) analisaram os efeitos do uso de agregados reciclados de concreto (RCA) e materiais pozzolânicos como substitutos parciais de agregados graúdos naturais (NCA) e cimento, respectivamente, nas propriedades mecânicas e de permeabilidade de misturas de concreto permeável reforçado com fibras. Para isso, foram preparadas misturas com 25%, 50%, 75% e 100% (em peso) de RCA como agregado graúdo, e o cimento foi parcialmente substituído por 10% de sílica ativa (SF) e 1%, 2% e 3% de nanoargila (NC). A fim de melhorar a resistência mecânica, fibras de aço (STF) e fibras plásticas residuais (WPF) foram incorporadas nas misturas em frações de volume de 1% e 2%. Os experimentos foram realizados em 2310 amostras fundidas, representando 110 diferentes misturas. Os resultados mostraram um aumento de até 25% na permeabilidade e uma redução de cerca de 60% nas propriedades de resistência da mistura com 100% de RCA.

A adição de SF e NC contribuiu para a melhoria das propriedades de resistência devido ao efeito de microenchimento e à reatividade pozolânica. De modo geral, a inclusão de fibras aumentou a resistência à compressão e à flexão em até 65% e 79%, respectivamente, em relação à mistura sem reforço, com 2% de STF. As misturas com WPF apresentaram desempenho inferior em comparação às reforçadas com STF, devido à baixa qualidade e fraca dispersão do WPF. Constatou-se que a combinação de 100% de RCA com 2% de STF e 2% de NC resulta em um concreto permeável adequado para aplicações estruturais.

No Quadro 1 são sumarizados as principais aplicabilidades, parâmetros avaliados e resultados obtidos nos estudos analisados ao longo da pesquisa, em que fundamentaram a avaliação da empregabilidade de agregados siderúrgicos e outros resíduos na confecção do concreto permeável. Observa-se que 40 % dos estudos se destinaram a verificar a potencialidade de aplicação de diversos tipos de resíduos (borracha, fibra de PET, vidro, clínquer de palma, concha e rocha ornamental), 35% das pesquisas avaliaram contribuições aos estudos sobre a aplicação da escória de aciaria *BSSF*, alto forno e os demais 25% (5 estudos) avaliaram o emprego do agregado reciclado em concreto permeável.

Quadro 1 — Compilação dos principais resultados e conclusões dos estudos analisados

Autor/ Ano	Tipo de pavimento	Tipo de resíduo	Misturas	Principal parâmetro analisado		
				Permeabilidade	Porosidade	Resistência mecânica
Cartaxo <i>et al.</i> (2023)	Concreto sustentável	Agregados de escória de aciaria <i>BSSF</i>	Cinco traços de concreto, com teores de substituição dos agregados naturais pela escória de aciaria <i>BSSF</i> de 0% (referência), 20%, 40%, 60% e 80%, em volume	-	-	Resistência à compressão, variou aproximadamente de 30 MPa a 45 Mpa.
Chan chai <i>et al.</i> , (2018)	Concreto Permeável	Agregado de calcário britado (LS); concreto reciclado (RC) e agregados de cinzas	9 traços com 15%, 20%, e 25% de agregado calcário britado e quatro níveis diferentes de substituição de agregados	0,0026 m/s a 0,0156 m/s	Variou entre 25,5% e 38,8%	Variou a resistência à compressão de 10,50 MPa a 17,14 MPa e resistência a tração na flexão de

		de carvão (BA)	de 0, 40, 60 e 100% (LS, RC e BA).			1,65 MPa a 2,75 MPa.
Ibrahim e Razak (2016)	Concreto Permeável	Clínquer de óleo de palma	Substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de Clínquer de óleo de palma.	0,0461 m/s e 0,0833 m/s de 0% a 100%.	23% a 35% aos 28 dias de 0% a 100%.	Resistência à compressão (9,51 MPa e 3,43 MPa) de 0% a 100%.
Lang <i>et al.</i> , (2019)	Concreto Permeável	Escória de aço	Três tamanhos diferentes de partículas: finas (FP) (2,5 – 5,0 mm); médias (MP) (5 – 10 mm) e grossas (CP) (10 – 15 mm).	0,006; 0,0065 e 0,007 m/s, respectivamente.	Variou entre (24,0% a 26,0%), respectivamente.	MP (30 MPa e 40 MPa); CP (30,0 MPa e 34,5 MPa) e FP (30,0 MPa e 34,5 MPa).
Lee <i>et al.</i> , (2022)	Concreto Permeável	Fibra de aço ou fibra de vidro.	Quinze misturas com fibra de aço (1%, 2%) ou fibra de vidro (0,25%, 0,5%).	Variou entre 0,0012 m/s e 0,0184 m/s.	Variou entre 7,33% e 21,78%.	Resistência à compressão Variou entre 26,82 MPa a 44,71 MPa.
Meddah <i>et al.</i> , (2019)	Concreto Permeável	Agregado graúdo natural; Concha de borracha; Vidro Plástico; Ferrocromo.	Substituíram parte do agregado natural por uma fração específica de agregado reciclado de diferentes materiais (borracha, concha triturada, vidro triturado, plástico triturado e ferrocromo).	0,009 m/s; 0,0093 m/s; 0,036 m/s; 0,0101 m/s; 0,016 m/s; 0,02 m/s, respectivamente.	(19,0 %; 12,0 %; 24,9 %; 17,6 %; 23,0 %; 23,0 %), respectivamente.	Resistência à compressão (15 MPa; 1,8 MPa; 4,2 MPa; 10,4 MPa; 6,3 MPa e 8,0 MPa).
Mehmet <i>et al.</i> (2014)	Concreto Permeável	Borracha de pneu	10 misturas de concreto contendo 0%, 5%, 10% e 20% de borracha.	0,0015 a 0,0046 m/s.	-	Resistência à compressão variou entre (6,50 MPa a 23,44 MPa), à tração (0,69 MPa a 2,06 MPa). Módulo elasticidade (4,5 a 28 MPa).

						Energia de fratura 3,1 a 67,7 N/m.
Mikami <i>et al.</i> (2018)	Concreto poroso	Três tipos de resíduos (2,92% de cerâmica vermelha do agregado reciclado; concreto obtido de blocos cerâmicos e Resíduos de construção e demolição)	Seis misturas de (100% basalto; 100% resíduo de concreto; 10% cerâmica + 90% concreto; 25%, de cerâmica + 75% concreto; 50% cerâmica + 50% concreto; e 100% resíduo de cerâmica vermelha.	0,0082 a 0,0095 m/s.	32,13% a 37,33%	Resistência à compressão entre 2,00 e 10,15 MPa.
Patil <i>et al.</i> (2022)	Bloco de Concreto Permeável	Fibra de PET	0%, 1%, 1,5% e 2% de resíduos de garrafas (PET)	-	Bl 0%= 34,4%, Bl 1= 32,02%; Bl 1,5=28,9% e Bl 2=23,8%.	Bl 0= 14,44 Pa e 14,53 MPa; Bl 1=22,75 MPa e 23,11 MPa; Bl 1,5=17,42 e 17,15 MPa e Bl 2= 8,71 e 9,42 MPa, respectivamente.
Pimentel <i>et al.</i> (2023)	Lajes de concreto permeável	Escória de aciaria (BSSF)	Três misturas c/ três tipos de agregados graúdos (brita 12,5 mm, brita 9,5 mm e escória de aço grossa) e agregado fino (escória fina).	0,00236 m/s; 0,00226 m/s e 0,00115 m/s.	Coefficiente de fluxos 97,36%; 96,24% e 92,65% (Respectivamente)	Resistência à tração na flexão 2,08 MPa; 2,51 MPa e 4,61 MPa.
Pils <i>et al.</i> (2019)	Concreto Drenante	Fibras de polipropileno	Três tipos de concreto foram elaborados: concreto convencional (referência-CC), concreto reforçado	K=0,0014m/s - Traço D3; k=0,000996 m/s, Traço D1; K=0,001237 m/s; Traço B 0,121 m/s.	-	Resistência à tração na flexão para as três misturas foram entre 57 MPa e 71 MPa. 31,6 MPa à compressão

			com macrofibras de polipropileno (CF) e concreto reforçado com macrofibras e (CFSP), com teor de 1,2 e 3 kg/m ³ de adição das fibras de polipropileno.			e 3,0 MPa à tração.
Sandoval <i>et al.</i> (2019)	Concreto permeável	Escória de alto forno (FEA)	Três FEA's c/ granulometria, 6-10 mm, 10-20 mm, e 30-70 mm.	0,01 a 0,012 m/s	15% a 20%	19 e 31 MPa e 3 a 4 MPa (Respectivamente)
Shen <i>et al.</i> , (2013)	Concreto Permeável	Pneu de borracha	Três traços: PC 0 - polímero sem adição de agregados de borracha; PMPC-1-substituídos por borracha; e PMPC-2 com polímero.	0,0058 m/s; 0,0057 m/s e 0,0061 m/s, respectivamente.	20,7 %; 19,3 % e 20,8 %, respectivamente.	Resistência ao impacto (kJ/m) 11,69; 12,28 e 12,76, respectivamente.
Shen <i>et al.</i> , (2020)	Concreto Permeável	Escória de aço carbonatada e gesso fosfatado.	Mistura de pó de escória de aço é substituído 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, 15%, 30%, 40%, 50% e 70% por fosfogesso respectivamente em 7 traços de concreto permeável e agregados de aço na (A) 95% de granulometria (9,5 a 16 mm) e 5% de (B) (4,75 a 9,5 mm).	-	Mais de 20%	Resistência à compressão de 82,6 MPa.

Simões <i>et al.</i> (2023)	Concreto permeável no formato de Bloco intertravado (pavers)	Resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais	Teores de 0%, 5%, 10% e 15% de RBRO, em substituição (em volume) ao cimento Portland	0,0014m/s a 0,0016 m/s	16,6 a 18,8%	Resistência à compressão aos 7 e 28 dias variou entre 14,7 MPa. e 27, 6 MPa.
Toghroli <i>et al.</i> , (2020)	Concreto Permeável	Agregados reciclados de concreto (RCA) e materiais pozolânicos	25%, 50%, 75% e 100% (em peso) de RCA como agregado graúdo e cimento parcialmente substituído por 10% de sílica ativa (SF) e 1%, 2% e 3% de nanoargila (NC). fibra de aço (STF) e fibra plástica residual (WPF) foram incorporadas nas misturas em uma fração de volume de 1% e 2%.	0,0013 m/s a 0,0261 cm/s	Variou de 16,4 % a 30,8 %.	Resistência à compressão, variou de 26,5 MPa a 28,9 MPa.
Tavares <i>et al.</i> (2016)	Concreto permeável	Resíduos de Construção e Demolição	Três traços de concreto (100% agregado natural; 50% agregado natural e 50% agregado reciclado; 100% agregado reciclado)	0,005 e 0,02m/s superior a 10^{-4} m/s.	-	Resistência à compressão entre 2,8 e 28 MPa.
Vardakia <i>et al.</i> (2014)	Concreto Permeável	Escória de aço, resíduos de construção e demolição e agregados calcários convencionais.	Mistura de cinco tipos de traços foram usados: 100% de escória de aço, resíduos de construção e demolição e 100% de	0,0009 a 0,0015 m/s.	10,72 a 22,39 %.	Variou entre 6 e 10 MPa.

			agregados calcários convencionais, 50% de agregados de calcário e 50% de escória de aço, 50% de escória de aço e 50% de resíduos RCD e o último 50% de agregados de calcário, 25% de escória de aço e 25% de resíduos RCD.			
Wang et al. (2020)	Concreto Permeável	Agregados naturais (NA) e escória de aço (SS).	Substituição do agregado natural por escória de aço em 5 traços (0%, 25%, 50%, 75% e 100%).	0,0049 m/s; 0,0048 m/s; 0,0043 m/s e 0,004 m/s, respectivamente.	15,9 %; 15,4 %; 14,6 % e 14,1 %, respectivamente.	Resistência a compressão aos 28 dias, (19,2 MPa; 21,1 MPa; 23,5 MPa; 25,8 MPa), respectivamente.
Yavuz (2024)	Concreto Permeável	Agregado reciclado	00% de agregado reciclado e quatro misturas contendo (20%, 40%, 60%, 80% de agregado reciclado).	0,0149; 0,0119 ;0,0126; 0,0185 e 0,0141 m/s, respectivamente.	17,2; 16,2; 16,4; 16,6 e 16,9, respectivamente.	Resistência à compressão (15,7 MPa; 27,4 MPa; 25,3 MPa; 21,2 MPa; 18,6 MPa), respectivamente. Resistência a tração na flexão (4,1 MPa; 4,9 MPa; 4,7 MPa; 4,5 MPa; 4,4 MPa), respectivamente.

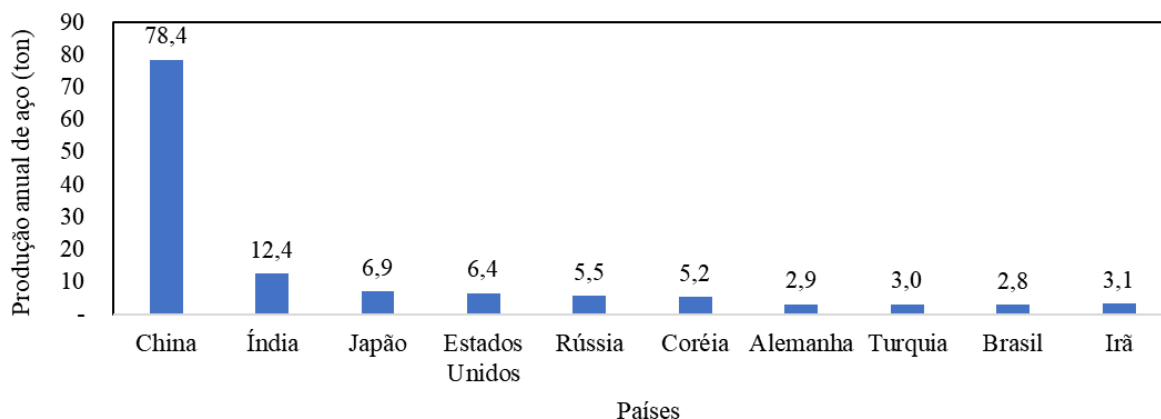
Fonte: Autora (2025).

3.5 Resíduos da Indústria siderúrgica

De acordo com *World Steel Association* (2024), a produção do aço bruto para 71 países/regiões do mundo atingiu 146,8 milhões de toneladas em novembro de 2024, a

exemplo, países como China, Índia, Japão, Estados Unidos, Rússia, Coreia do Sul, Alemanha, Turquia e Brasil foram as principais regiões a nível de produção mundial de aço bruto, respondendo por 98% do total da produção global de aço bruto (Figura 7).

Figura 7 — Produção mundial de aço bruto



Fonte: World Steel Association (2024).

A indústria siderúrgica possui relevante destaque na economia mundial. O Brasil é o 9º maior produtor de aço no mundo, segundo dados levantados pelo Instituto Aço Brasil para o ano de 2024, em lista liderada pela China. Além disso, há no país 31 usinas distribuídas em 10 estados brasileiros, gerando riquezas, além de empregar aproximadamente 122 mil pessoas somente em 2024 (IABR, 2024).

Dessa forma, com dados do Instituto Aço Brasil (IABR, 2024), a indústria do aço produziu 1.892 bilhões de toneladas de aço bruto. No Brasil, essa produção chegou a 33,7 milhões de toneladas de aço bruto, entre os meses de janeiro a dezembro de 2024. Em contrapartida, para Amancio *et al.* (2020), essas indústrias são responsáveis por gerar subprodutos, onde estima-se que a cada 3 toneladas de aço produzidas resultam em até 1 tonelada de escória.

Segundo a *National Slag Association* (2025), as escórias são materiais derivados que podem ser aplicados de forma sustentável em diversos setores da construção. Em especial, as escórias de alto-forno têm sido amplamente empregadas em diferentes aplicações relacionadas à pavimentação, como: bases granulares para pavimentos, agregados para concreto simples e armado, camadas de macadame, aterros, proteção de taludes, bases ou aterros leves, fabricação de cimento, além de bases e sub-bases, utilizadas como agregado em asfalto quente, na fabricação de cimento, acostamentos para construção de rodovias e em áreas de estacionamento e caminhos não pavimentados.

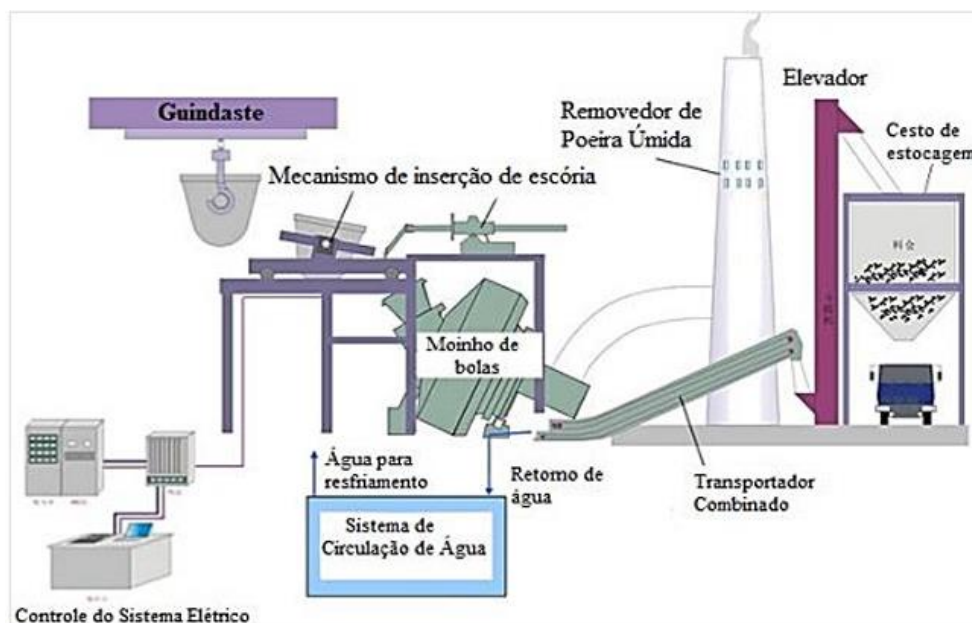
A Companhia Siderúrgica do Pecém, atual ArcelorMittal unidade Pecém, localizada no estado do Ceará, para cada tonelada de aço líquido processado gera 172 kg de escórias de aciaria como resíduos siderúrgicos (CSP, 2024). De acordo com os estudos de Costa (2023) isso representa aproximadamente 4,2 milhões de toneladas de subprodutos produzidos no país apenas no ano de 2022. Em relação à produção da ArcelorMittal Pecém de 2,8 milhões de toneladas em 2022, isso representa cerca de 350 mil toneladas de resíduo de aciaria em um ano.

A escória de aciaria é um coproduto gerado no processo de conversão do ferro-gusa líquido e/ou da sucata fundida em aço. Sua composição é predominantemente formada por silicatos de cálcio, óxido de silício, ferrita cálcica e magnésia, além de conter pequenas quantidades de outros minerais e impurezas (Jiang *et al.*, 2018; Naidu *et al.*, 2020).

Existe outra forma de resfriamento e beneficiamento da escória de aciaria, como mostrado na Figura 8, ao qual foi desenvolvida pela empresa chinesa Baosteel Metal Company, conhecido popularmente por *BSSF* (*Baosteel's Slag Short Flow* / Fluxo Curto de Escória da Baosteel) apresenta-se como um processo diferenciado por dois aspectos. O primeiro está relacionado ao contexto tecnológico, uma vez que se trata de uma técnica pioneira no Ocidente, adotada por apenas uma siderúrgica em sua linha de produção de aço, resultando em um material com propriedades distintas das obtidas pelos processos convencionais (Amancio *et al.*, 2020). O segundo corresponde às próprias vantagens do método onde resfria e estabiliza, com poucos minutos toneladas de material (Benitez, 2020). O resfriamento para esta tecnologia, são empilhados montantes de escória em que são lançadas em um recipiente rotativo com esferas de aço, cujo sistema de refrigeração com base na circulação contínua de água atua, sendo o processo em que o material é resfriado, solidificado e britado simultaneamente (Amancio *et al.*, 2020).

A escória *BSSF* resultante é enviada para um sistema de separação, em que divide os montantes em função do tamanho dos seus grãos, a fim de prepará-los para sua próxima destinação. Esse processo tem como vantagem a separação simples do metal residual, não se misturando assim com a escória na fase de descarregamento, em que apresenta pontos de solidificação diferentes, capacidade volumétrica de resfriamento, processando toneladas de material em ciclos com duração de 3 a 5 minutos e redução significativa da quantidade de cal livre na composição (Wang *et al.*, 2016; Benitez, 2020).

Figura 8 — Processo de resfriamento e beneficiamento da escória de aciaria LD por Fluxo curto de escória da Baosteel (*BSSF*)



Fonte: China Baowu Group (2022).

Pelos estudos e práticas da CSP (2024), o processo tecnológico de tratamento do agregado siderúrgico, denominado *BSSF* (*Baosteel's Slag Short Flow*) é inédito no Brasil em que resulta em 240 mil toneladas por ano do agregado siderúrgico *BSSF*.

Dessa forma, com base nos estudos avaliados quanto a aplicação de agregados siderúrgicos *BSSF*, observa-se um desempenho positivo quanto à materiais constituintes tanto parciais quanto integrais na construção civil, conforme demonstrado nos seguintes exemplos: Costa (2023) analisou a viabilidade técnica e ambiental do emprego de agregado siderúrgico tratado pelo processo *BSSF* (*Baosteel's Slag Short Flow*) em teores de 25%, 50% e 75% (em relação à massa de solo) em camadas granulares de pavimentos como agente estabilizante de solo. Amancio *et al.* (2020) avaliaram propriedades mecânicas de argamassas no estado fresco nos traços 1:3, 1:5, 1:7 (cimento: agregado), 1:1:4, 1:1:6 e 1:1:8 (cimento: cal: agregado), produzidos com a substituição da areia natural por escória de aciaria *BSSF* nos teores de 0 %, 20 %, 40 % e 60 %, em volume. Pimentel *et al.* (2023) estudaram a relação entre o desempenho de placas de concreto permeáveis com escória de aciaria *BSSF* e as propriedades de forma de agregados graúdos, em três misturas diferentes, usando três tipos de agregado graúdo (brita 12,5 mm, brita 9,5 mm e escória de aciaria grossa) e um tipo de agregado miúdo (escória fina) foram testadas.

3.6 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A ideia de ACV foi adotada pela primeira vez por volta de 1970 (Balaguera *et al.*, 2018; Hunt *et al.*, 1996), conduzidos principalmente para analisar produtos de consumo ou materiais e componentes da vida diária (Balaguera *et al.*, 2018).

No entanto, ao longo do tempo, a ACV evoluiu para avaliar os impactos ambientais de sistemas mais complexos, como edifícios (Balaguera *et al.*, 2018), túneis e construções subterrâneas (Xiangrui *et al.*, 2023; Gong *et al.*, 2022) ou estruturas de pavimentos (Zhao, 2021). No caso de pavimentos rodoviários, o impacto no meio ambiente e na saúde humana é significativo porque grandes quantidades de materiais são necessárias para a construção e reabilitação, enquanto a temperatura necessária para misturas asfálticas pode causar grandes quantidades de energia, gases de exaustão, material particulado, dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono (Praticó *et al.*, 2020; Capitão *et al.*, 2012; Rubio *et al.*, 2013).

Portanto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) consolidou-se como uma das principais ferramentas para mensurar o impacto ambiental dentro do tripé da sustentabilidade, que também abrange os aspectos econômico e social. Embora tenha sido aplicada pela primeira vez no final da década de 1990 para a análise de diferentes tipos de pavimentos (Häkkinen; Mäkelä, 1996; Horvath; Hendrickson, 1998), foi na última década que se observou um crescimento significativo nas pesquisas envolvendo ACV em pavimentação. A maior parte desses estudos tem se concentrado na comparação entre pavimentos de concreto e asfálticos, abordando temas como a contabilização da energia incorporada às matérias-primas, o efeito do albedo e o fenômeno da carbonatação do concreto.

Para pavimentos, o termo "ciclo de vida" refere-se às principais atividades ao longo de sua vida útil, desde a aquisição de materiais, construção, uso e manutenção até o descarte final. A ACV de pavimentos é uma técnica utilizada para avaliar o potencial impacto ambiental associado às diversas fases da vida útil do pavimento (Aurangzeb *et al.*, 2014).

Segundo a NBR 14.040 (ABNT, 2009), a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia padronizada que permite identificar, quantificar e classificar os potenciais impactos ambientais associados a atividades, sistemas ou projetos ao longo de todas as etapas de seu ciclo de vida. No caso de pavimentos, geralmente são considerados os estágios de extração e processamento de matérias-primas, produção das misturas, transporte,

execução da obra e fim da vida útil (Schlegel *et al.*, 2016; Azarijafari *et al.*, 2016; Hou *et al.*, 2022).

3.6.1 Definição e etapas da ACV - NBR 14040/44 (ABNT, 2009).

De acordo com as NBR 14040 (ABNT, 2009) e NBR 14044 (ABNT, 2009), a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) deve ser conduzida em quatro fases principais:

- I) Definição do objetivo e escopo:** envolve a delimitação do sistema a ser estudado e o nível de detalhamento necessário. A profundidade e a abrangência da ACV podem variar conforme os objetivos específicos do estudo.
- II) Análise do inventário do ciclo de vida:** trata-se de um inventário dos dados de entrada/saída associados ao sistema estudado. Envolve a coleta dos dados necessários para atingir os objetivos.
- III) Avaliação de impacto do ciclo de vida:** nesta fase, os dados do inventário são interpretados por meio de categorias de impacto ambiental, que servem para condensar, classificar e compreender os efeitos potenciais associados ao ciclo de vida do produto ou processo.
- IV) Fase de interpretação:** os resultados obtidos nas fases anteriores são analisados, resumidos e discutidos com o objetivo de gerar conclusões, recomendações e apoiar a tomada de decisões.

3.6.2 Ferramentas de ACV

No campo da infraestrutura rodoviária, é comum usar várias ferramentas de ACV específicas para pavimentos, incluindo, mas não se limitando às seguintes: ROAD-RES, PaLATE, modelo de ACV para pavimento asfáltico do Reino Unido, ROAD-DEO, CMS RIPT, CFET, ECORCE-M, DuboCalc, CO2NSTRUCT, Greencalc+, Ecosoft, modelo de ACV para pavimento asfáltico VTTI/UC e Athena Impact Estimator for Highways (Santos *et al.*, 2017; Yarramsetty *et al.*, 2017; Asres *et al.*, 2021).

Para Bloom *et al.* (2016) devido a ampla variedade de resultados ambientais, à simplicidade e ao alto potencial de personalização para atender aos objetivos do projeto, o

PaLATE se destaca em relação às demais ferramentas de ACV, pois foi desenvolvido especificamente para pavimentos.

De acordo com Subedi *et al.* (2018) o PaLATE é uma ferramenta complementar gratuita desenvolvida para o Microsoft Excel pelo *Consortium on Green Design* em parceria com a Universidade da Califórnia, em Berkeley. Essa ferramenta avalia os custos e os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida por meio de uma abordagem híbrida de Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada a diferentes alternativas de pavimentação.

Dessa forma, a ferramenta PaLATE fornece dados sobre os impactos ambientais em 12 categorias, a saber: consumo de energia (CE), consumo de água (CA), emissões de dióxido de carbono (CO₂), emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), emissões de partículas com diâmetro inferior a 10 µm (PM₁₀), emissões de dióxido de enxofre (SO₂), emissões de monóxido de carbono (CO), emissões de mercúrio (Hg), emissões de chumbo (Pb), geração de resíduos perigosos RCRA gerados lixiviados (HWG), geração de aldeídos (AG), geração de benzo[a]pireno (BG) e potencial de toxicidade humana, tanto cancerígena (HTP-C) quanto não cancerígena (HTP-NC).

4. MATERIAL E MÉTODOS

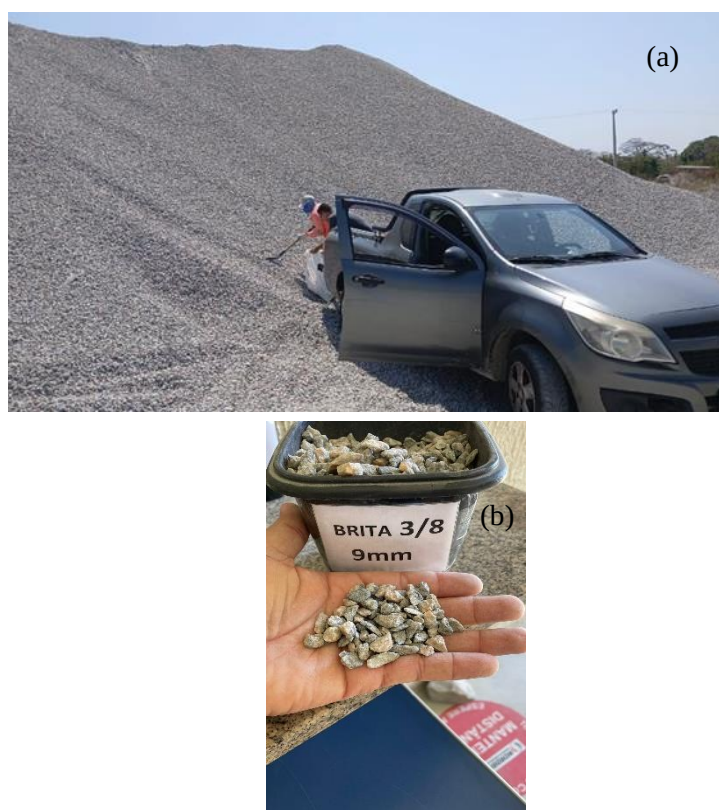
Este capítulo tem como objetivo apresentar informações sobre a caracterização dos materiais empregados, assim como os critérios e métodos adotados para a realização da pesquisa.

4.1 Coleta de materiais utilizados

4.1.1 Agregado natural

O agregado natural (AN) utilizado nesta pesquisa foi fornecido pela empresa Nordeste Mineração - Nordbrita, localizada no município de Maracanaú, na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), no Estado do Ceará. Para coleta e seleção dos agregados graúdos naturais, foram baseadas em faixas de tamanho de 4,8 mm, 6,3 mm, 9 mm e 12,5 mm com base nas dimensões estabelecidas pela ACI 522 R (2010) para a produção do concreto permeável. Na Figura 9 ilustra-se o processo de coleta (a) e (b) seleção do agregado natural.

Figura 9 — Local de coleta (a) e seleção (b) do agregado natural



Fonte: Autora (2025).

Os ensaios de caracterização do material foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do *campus* Fortaleza, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE).

4.1.2 Agregado siderúrgico

O agregado siderúrgico (AS) produzido pelo processo *BSSF* foi obtido a partir de doação proveniente da empresa Sudamin Refratário Nordeste LTDA, localizada no município de São Gonçalo do Amarante, Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), distante aproximadamente 62 km de Fortaleza. Na Figura 10 apresenta-se o local da coleta do material (a) que ocorreu no dia 08 de outubro de 2024.

Figura 10 — Local da coleta do agregado siderúrgico *BSSF* (a) e separação das amostras com auxílio de peneirador elétrico(b)



Fonte: Autora (2025).

Como a empresa *Sudamin* Refratários LTDA recebe o agregado siderúrgico da ArcelorMittal em diversas granulometrias, foi necessário utilizar uma retroescavadeira para

retirar o material mais fino da parte superior da pilha de agregado. Em seguida, esse material passou por um peneirador elétrico no local (b), a fim de assegurar que a granulometria estivesse conforme os requisitos para a produção do concreto permeável, conforme pela ACI 522 R (2010).

Posteriormente, em laboratório foram feitos procedimentos de pesagem do material em peneirador elétrico, contendo as peneiras com as seguintes aberturas: 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3 mm e 4,8 mm, os materiais superiores a 12,5 mm e inferiores a 4,8 mm foram descartados. Por fim, o restante do material, retidos nas peneiras de 4,8 mm a 12,5 mm, foram separadas granulometricamente, com objetivo de atender a granulometria dos materiais utilizados em pesquisas anteriores (Pimentel *et al.*, 2023; ACI 522 R, 2010; Deo; Neithalath, 2010; Huang *et al.*, 2010; Nguyen *et al.*, 2014) para posterior caracterização da amostra.

Além do tamanho dos agregados utilizados, os tipos de agregados, bem como suas formas e distribuições granulométricas têm influência na resistência mecânica, nas características de permeabilidade e na durabilidade a longo prazo do pavimento de concreto permeável, conforme exemplifica os estudos de Kevern *et al.* (2009a).

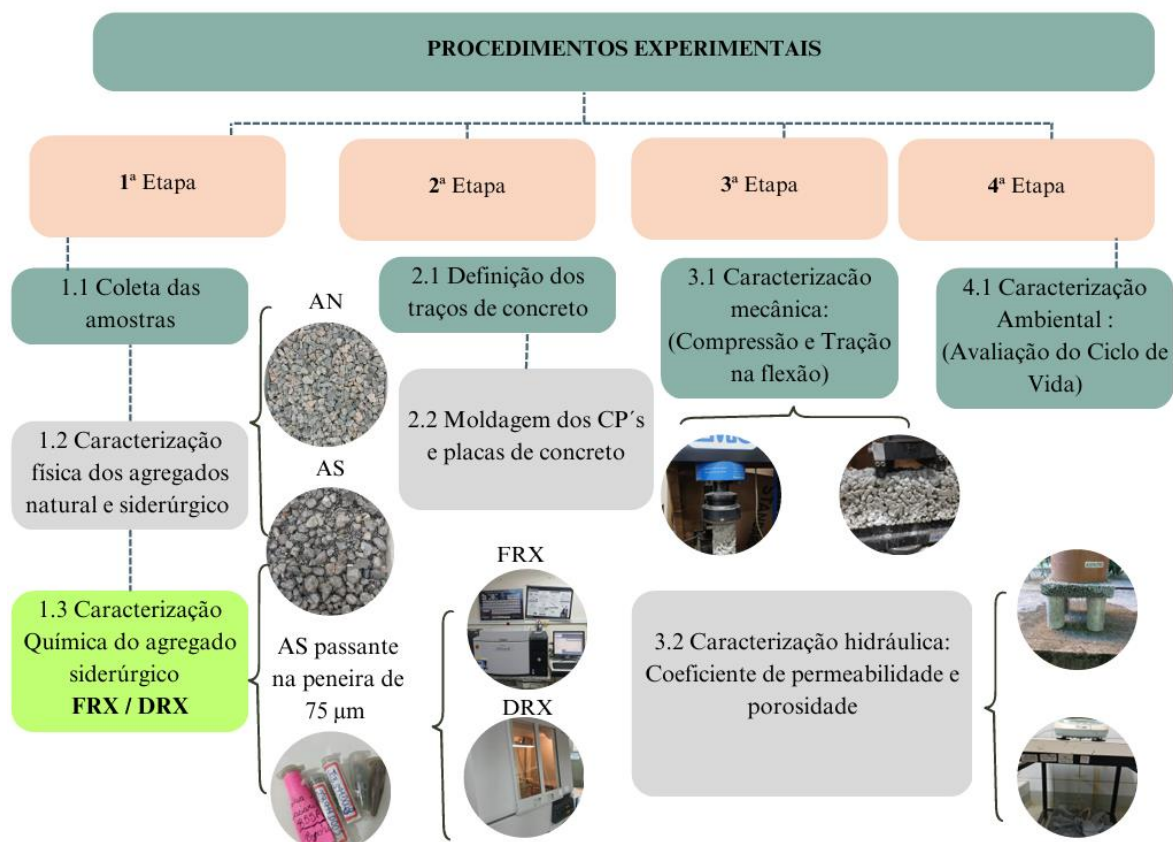
4.2 Caracterização física, química e ambiental dos agregados naturais e siderúrgicos

Realizou-se ensaios de caracterização física das amostras de agregados naturais (AN) e siderúrgicos (AS). Análise química, Fluorescência de Raio X e Difração de Raio X (FRX e DRX), dos agregados siderúrgicos (AS) e avaliação do ciclo de vida dos agregados naturais e escória de aciaria pelo processo *BSSF* para possível impacto ambiental. Em seguida, calculada a dosagem do concreto para a produção do concreto permeável.

Com base nisso, foi definido o traço de concreto a ser utilizado, a partir do qual foram moldados seis corpos de prova cilíndricos e seis prismáticos para cada traço: 100% de agregado siderúrgico (100%AS), 100% de agregado natural (100%AN) e com substituição de 50% por agregado siderúrgico (50%AS-50%AN). Ao todo, foram moldados 18 corpos-de-prova para os ensaios mecânicos (compressão e tração na flexão), além de três placas de concreto permeável, com intuito de analisar a condutividade hidráulica e a porosidade, conforme as metodologias descritas em ABNT (2015) e ASTM (C1754/12), respectivamente.

Na Figura 11 estão descritos resumidamente o fluxograma dos processos de desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 11 — Fluxograma de processo



Fonte: Autora (2025)

Os ensaios de caracterização física e química realizados nas amostras naturais e siderúrgicas, bem como suas respectivas normas, estão detalhados na Tabela 4.

Tabela 4 — Normas de referência para a realização dos ensaios de caracterização física e química do agregado natural e siderúrgico

Caracterização	Ensaio	Norma	Amostras
Física e Química	Granulometria	NBR 17054 (ABNT, 2022).	Agregado natural e siderúrgico
	Densidade e absorção de água	NBR 16917 (ABNT, 2021)	
	Massa unitária solta e compactada	NBR 16972 (ABNT, 2021)	
	Teor de material fino que passa pela peneira de 75 µm	NBR 16973 (ABNT, 2021)	
	Fluorescência de Raio X (FRX)	-	Agregado siderúrgico
	Difração de Raio X (DRX)		

Fonte: Autora (2025).

A seguir, são apresentados os ensaios físicos e químicos realizados para a caracterização do agregado natural e siderúrgico.

a) Análise granulométrica

A determinação da granulometria do agregado natural e siderúrgico foi realizada com base na NBR 17.054 (ABNT, 2022). Para a execução do ensaio, foi utilizado um conjunto de peneiras para agregados graúdos com os seguintes tamanhos: 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3 mm e 4,75 mm, sendo o processo conduzido por meio de um agitador mecânico. Em seguida, os materiais foram pesados, calculados e analisados, incluindo o módulo de finura (MF), a dimensão máxima característica (DMC) e o teor de material pulverulento, etapas essenciais para definir a dosagem do concreto.

b) Massa específica e absorção de água

Os ensaios para determinação de massa específica e absorção de água seguiram a NBR 16917 (ABNT, 2021). Utilizou-se uma amostra de 3 kg, com dimensão máxima característica de 19 mm. A amostra foi submersa em água por 24±4 horas, depois retirada, enxugada até eliminar o brilho e pesada como agregado saturado com superfície seca (ms). Para determinar a massa em água, a amostra foi colocada em um cesto acoplado à balança

hidrostática, submerso em água a $23\pm 2^{\circ}\text{C}$, e a massa foi registrada. Após a pesagem, a amostra foi seca em estufa a $100\pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas para a obtenção da massa do agregado natural (a) e siderúrgico (b) seco.

A massa específica do agregado seco foi obtida através da Equação 1.

$$d = \frac{m}{ms - ma} \quad (1)$$

A massa específica do agregado saturado da superfície seca foi determinada através da Equação 2.

$$ds = \frac{ms}{ms - ma} \quad (2)$$

A massa específica aparente do agregado seco foi determinada pela Equação 3.

$$da = \frac{m}{ms - ma} \quad (3)$$

A absorção do agregado foi obtida através da Equação 4.

$$A = \frac{ms - m}{m} \times 100 \quad (4)$$

Em que: m é a massa ao ar da amostra do agregado seco (g); ma é a massa em água do agregado (g); ms é a massa do agregado saturado da amostra na condição superfície seca (g); A é a absorção de água do agregado (%); d é a massa específica do agregado seco (g/cm^3); ds é a massa específica do agregado saturada superfície seca (g/cm^3), e da é a massa específica aparente (g/cm^3).

c) Massa unitária solta e compactada e volume de vazios

A determinação da massa unitária solta e compactada e o volume de vazios dos agregados foram realizadas seguindo as especificações da NBR 16972 (ABNT, 2021).

d) *Fluorescência de Raio X (FRX) e difração de Raio X (DRX)*

O ensaio de fluorescência de raio X permite a determinação de elementos químicos das amostras analisadas. A análise espectrométrica por fluorescência de raio X, tem fins qualitativos e quantitativos baseando-se em medições dos raios X característicos, resultantes da excitação dos elementos constituintes da amostra é irradiada por um espectro contínuo de raios X que causa a emissão de fluorescência (Santos *et al.*, 2013).

Segundo Bleicher e Sasaki (2000), a fluorescência de raio X (FRX) é um método não destrutivo para análise da constituição química de sólidos e líquidos, essas amostras são devidamente preparadas e expostas a um feixe de radiação, permitindo a excitação da amostra e a detecção da radiação fluorescente gerada pela interação com seu material, a qual o deslocamento de um elétron das camadas mais internas do átomo. Posteriormente, outro elétron de uma das camadas mais externas, substitui o elétron perdido, liberando energia na forma de raios X irradiados em comprimento de onda, sendo característicos de cada elemento, de intensidade proporcional à concentração. Nesta pesquisa, para o entendimento da composição química do agregado siderúrgico, amostras do material foram submetidas aos ensaios de Difração de Raio X (DRX) e Fluorescência de Raio X (FRX) no laboratório de Raio X, no Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará – UFC.

Para as medidas de Difração de Raio X (DRX), O equipamento empregado foi o difratômetro para amostras policristalinas, modelo XPert Pro MPD – Panalytical e o para Efluorescência de Raio X (FRX), Fluorescência de raios X realizada com o equipamento ZSXMini II (Rigaku) para quantificação de elementos do flúor ao urânio.

4.3 Estudo da dosagem do concreto permeável

Para análise das propriedades do concreto permeável, foram preparadas misturas com agregados naturais, siderúrgicos (BSSF), cimento Portland CP V (lote 1537828/10 1829 C) e água potável fornecida pela CAGECE, conforme normas técnicas.

A dosagem seguiu os princípios descritos por Tavares *et al.* (2016), Costa *et al.* (2018) e Pimentel *et al.* (2023), considerando o equilíbrio entre volume de vazios, teor de pasta, trabalhabilidade e resistência.

A definição de traço considerou a equivalência do Dimensão Máximo Característico (DMC) do agregado siderúrgico, conforme Sandoval *et al.* (2019), utilizando a faixa

granulométrica entre 4,8 mm e 12,5 mm, adequada à produção de concreto permeável, dada a ausência de normativo específico. Foram estabelecidos três concretos: 100% de agregado siderúrgico (100%AS), 100% de agregado natural (100% AN) e mistura 50/50 (50% AS-50% AN).

Para os pesquisadores, Merighi *et al.* (2006), Polastre e Santos (2006), Teixeira e Fortes (2009), o concreto drenante deve ter a relação de agregados graúdos entre 4 e 4,5 para 1 de cimento, a relação da areia entre 0 e 1 para 1 de cimento, e a relação água/cimento (a/c) deve estar entre 0,27 e 0,40. A partir destes estudos, foi elaborado também o traço referência.

Segundo ACI 522 R (2010), o concreto permeável é classificado normalmente como um material de granulometria aberta, *slump* de zero de abatimento com uma relação água-cimento (a/c) na faixa de 0,25 a 0,40, composto por cimento Portland, agregado graúdo, pouco ou nenhum agregado miúdo, aditivos e água. A combinação desses componentes resulta em um material endurecido com poros interconectados, cujo tamanho varia entre 2 e 8 mm, que permitem a passagem fácil da água. O teor de vazios pode variar de 15% a 35%, com resistências à compressão típicas de 2,8 a 28 MPa e permeabilidade de 0,014 a 0,122 cm/s.

As propriedades mecânicas e hidráulicas avaliadas e respectivas normas de referência para as misturas de concreto permeável podem ser verificadas na Tabela 5.

Tabela 5— Normas de referência para a realização dos ensaios de caracterização mecânica e hidráulica das misturas e corpos-de-prova com agregado natural e siderúrgico

Propriedade	Ensaio	Normas	Material
Mecânica e hidráulica	Resistência à compressão	NBR 5739 (ABNT,1994)	Corpos-de-prova com agregado natural e siderúrgico
	Resistência à tração na flexão	NBR 12142 (ABNT, 2010)	
	Coeficiente de permeabilidade	NBR 16416 (ABNT, 2015)	Placas com agregado natural e siderúrgico
	Porosidade	ASTM C1754/ C1754M-12	

Fonte: Autora (2025).

As baixas relações a/c podem causar coesão e consistência insuficientes, reduzindo assim as ligações entre as partículas. O concreto permeável depois de misturado deve ser

plástico e capaz de ser moldado quando espremido manualmente como especificado por Kevern *et al.* (2009b).

Na Tabela 6 são apresentadas as proporções e consumo de materiais utilizados nos três traços confeccionados.

Tabela 6 — Proporções dos traços e consumo de materiais utilizados

Concreto	Traço em massa	Consumo de materiais em kg			
		Cimento	Agregado Siderúrgico	Agregado natural	Água
100% AS			182	0,0	
100% AN	1:0:5,87:0,40	50	0,0	129,9	20
50% AS 50% AN			91	64,6	

Fonte: Autora (2025)

O consumo de materiais seguiu as proporções estabelecidas para cada traço e a relação água/cimento (a/c) foi mantida constante para todas as misturas desenvolvidas, garantindo uniformidade na avaliação dos desempenhos mecânico e hidráulico do concreto.

4.3.1 Produção, preparo e moldagem dos corpos-de-prova

A mistura dos materiais foi feita em uma betoneira de 120 litros, dividida em duas betonadas, devido ao volume total de 84 litros necessário para a produção do traço. Dessa forma, a mistura foi processada em duas partes iguais, com um tempo total de 5 minutos, dividido em dois intervalos de 2,5 minutos, para assegurar a homogeneização do material retido na betoneira.

A sequência de adição dos materiais foi padronizada para todas as misturas: inicialmente metade do agregado natural ou siderúrgico, seguida por parte da água e do cimento. Em seguida, foram adicionados os materiais restantes, garantindo uma distribuição uniforme dos componentes ao final da betonada.

Para a realização dos ensaios mecânicos, foram moldados 6 corpos-de-prova cilíndricos (10 cm × 20 cm) para o ensaio de resistência à compressão, conforme a NBR 5739 (ABNT, 1994) e 6 corpos-de-prova prismáticos (50 cm × 15 cm × 15 cm), seguindo as orientações da NBR 12142 (ABNT, 2010) para a análise da resistência à tração na flexão, em conformidade ao exigido na NBR 16.416 (ABNT, 2015) e por fim, a elaboração de uma

placa de concreto permeável (35 cm × 35 cm × 6 cm), para os ensaios de condutividade hidráulica e porosidade.

A pesquisa totalizou nas misturas dos materiais (a), no processo de moldagem de 3 placas (b), 18 corpos-de-prova cilíndricos (c), 18 prismáticos (d) (Figura 12), correspondentes aos três traços de concreto permeável desenvolvidos.

O processo de adensamento adotado para os três traços (concretos 100%AS, 100%AN e 50%AS-50%AN) foi realizado em haste, seguindo o procedimento de compactação em duas camadas de 25 golpes para cada peças cilíndricas (10 x 20 cm) e prismáticos (50 x 15 x 15 cm) confeccionada. A energia de compactação foi definida com base no estudo de Costa *et al.* (2018), uma vez que atualmente, não existe um método normatizado para o processo de compactação de corpos-de-prova para a avaliação da resistência mecânica e tração na flexão do concreto permeável. Sendo um dos métodos sugeridos, considerar um tamanho de amostra tradicional do cilíndrico (10 cm x 20 cm), com um esforço compacto de mistura fresca em duas camadas, fornecendo de vinte a vinte cinco golpes por camada usando a haste de compactação.

Figura 12 — Mistura dos materiais na betoneira (a), Moldagens das placas (b), corpos-de-prova cilíndricos (c) e prismáticos (d)



Fonte: Autora (2025).

Para as placas de concreto, adotou-se o adensamento, utilizando um corpo de prova (15 x 30) para compactar, conforme Schwetz *et al.* (2014). Após a moldagem, os corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos permaneceram nos moldes por 48 horas sendo então desmoldados e submetidos à cura submersa até a realização dos ensaios de resistência aos 28 dias.

Para o Comitê ACI 522 R (2010) a conectividade dos poros é essencial para a função do concreto permeável, sua compactação é restrita porque pode resultar em uma camada de pasta de cimento na parte inferior da estrutura de concreto que afetaria negativamente a permeabilidade.

Pils *et al.* (2019) afirma que considerando as principais aplicações do concreto drenante em pavimentações, o estudo do adensamento por meio de um rolo compactador mostra-se viável, pois pode melhorar as propriedades mecânicas do material. No entanto, é fundamental avaliar se essas técnicas comprometem a permeabilidade, característica essencial desse tipo de concreto.

Após a moldagem, os corpos-de-prova cilíndricos, prismáticos e as placas de concreto permeáveis foram identificados e mantidos em temperatura ambiente por 48 horas. Em seguida, realizou-se a desmoldagem e os corpos-de-prova foram submersos em água até o momento do rompimento, aos 28 dias, conforme as recomendações de cura estabelecidas na NBR 5738 (ABNT, 2015).

Posteriormente, ao período de cura, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência mecânica à compressão e à tração na flexão e as placas submetidas aos ensaios de permeabilidade e porosidade. Na Figura 13 apresentam-se as amostras moldadas e posicionadas no tanque, ilustrando o processo de cura adotado para garantir a adequada hidratação do concreto permeável.

Figura 13 — Corpos de prova prismáticos e cilíndricos no tanque para cura.



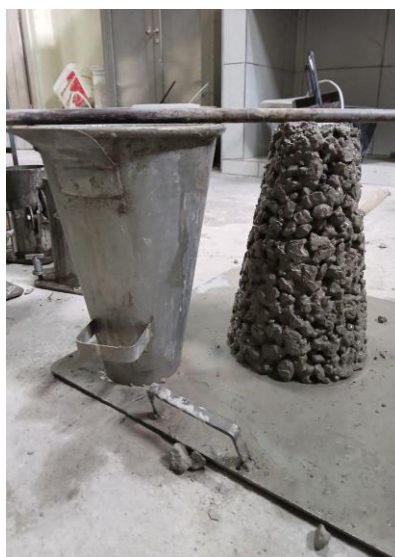
Fonte: Autora (2025).

4.3.2 Consistência (*abatimento de tronco de cone*)

Para avaliar a consistência do concreto drenante, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, obtendo-se *slump* igual a zero em todos os testes (Figura 14). De acordo com a ACI 522 R (2010), esse resultado é característico do concreto drenante, classificado como concreto com abatimento zero. Devido à baixa finura dos materiais na dosagem, à reduzida relação a/c e à quantidade limitada de pasta, esse tipo de concreto apresenta baixa trabalhabilidade, exigindo cuidados adicionais durante o manuseio e a compactação.

O ensaio é normalizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998) e tem como objetivo determinar a consistência de concreto pelo abatimento do tronco de cone. A metodologia do ensaio baseia-se no abatimento do tronco de cone, que é obtido pela diferença da altura do concreto e do molde do tronco de cone, exemplificado na Figura 14.

Figura 14 — Abatimento zero do concreto permeável para o traço 50%AS-50%AN



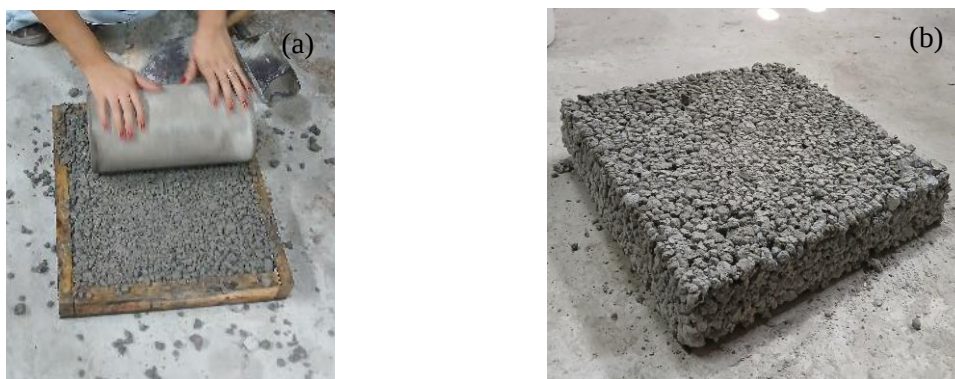
Fonte: Autora (2025)

4.3.3 Execução das placas de concreto

Foram confeccionadas placas de concreto permeável com 35 cm de largura por 35 cm de comprimento e 6 cm de altura para a análise de coeficiente de permeabilidade (k) utilizando compactação por rolo compactador manual de concreto (15 x 30 cm), adaptado, baseado no estudo de Schwetz *et al.* (2014). Após 48 horas as placas foram desmoldadas, para em seguida, decorridos 28 dias ser realizado o ensaio de determinação do coeficiente

de permeabilidade, tendo como referência, Costa *et al.* (2018). Na Figura 15 são apresentados o processo de confecção (a) e desmolde das placas (b).

Figura 15 — Moldagem da placa de concreto permeável (a) e placa desmoldada (b) para ensaio de coeficiente de permeabilidade para traço de 100% de agregado siderúrgico.



Fonte: Autora (2025).

4.3.4 Análise do coeficiente de permeabilidade da placa

Com a finalidade de obter o coeficiente de permeabilidade (k) que representa a velocidade com que uma determinada quantidade de água percola um elemento ou estrutura permeável, foram utilizados procedimentos baseados na NBR 16.416 (ABNT, 2015). De acordo com a norma, considerando as condições locais, exige-se que a permeabilidade do subleito, definida pelo coeficiente de permeabilidade k (m/s), seja superior a 10^{-3} m/s.

Segundo a norma, para realização do procedimento, o pavimento deve estar limpo de sedimentos e outros materiais que não estejam aderidos ao pavimento. Após a limpeza, foi utilizado um anel de infiltração cilíndrico vazado com diâmetro de 300 mm, em que neste anel foram feitas duas linhas de referência com distâncias de 10 mm e outra com 15 mm na face inferior ao anel, conforme exigido pela norma. Em que foi posicionado na placa do ensaio e vedado com massa de calafetar, na parte em contato com o pavimento, para não permitir vazamentos.

Após a colocação do anel de infiltração, inicia-se o ensaio em até 2 minutos depois da pré-molhagem do local. Para esse trabalho realizou-se o ensaio 6 vezes em cada placa confeccionada, para média dos resultados do coeficiente de permeabilidade (k). Em todas as placas, utilizou-se a massa de água de 18 kg para o tempo de pré-molhagem igual ou inferior a 30 segundos (Figura 16).

Figura 16 — Ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade (k) na placa de concreto permeável.



Fonte: Autora (2025).

O coeficiente de permeabilidade (k) usado foi calculado com a seguinte Equação 5 abaixo:

$$\frac{k = C \cdot m}{(d^2 \cdot t)} \quad (5)$$

Onde: K é o coeficiente de permeabilidade expresso em milímetros por hora (mm/h); m é massa de água infiltrada expressa em quilogramas (kg); d representa o diâmetro interno do cilindro de infiltração, expresso em milímetros (mm); t corresponde ao tempo necessário para a completa percolação da água, expresso em segundos (s).d é o diâmetro interno do cilindro de infiltração expresso em milímetros (mm); t é o tempo necessário para toda a água percolar expresso em segundos (s); C fator de conversão de unidade do sistema SI, com valor igual a 4583666000.

4.3.5 Análise da porosidade da placa permeável

A porosidade das placas permeáveis fora obtida baseadas na adaptação da norma ASTM C1754-12M. Os ensaios foram realizados após decorridos 28 dias da confecção das placas, para os três traços elaborados.

Em seguida, a aferição do peso das suas massas secas, as placas foram submersas em banho maria por 30 minutos. As massas submersas foram medidas com uma balança hidrostática (Figura 17). O volume da placa foi determinado com base na medição de comprimento, largura e espessura.

Figura 17 — Ensaio de porosidade na placa.



Fonte: Autora (2025).

A porosidade (P) foi calculada seguindo a Equação 6 abaixo:

$$Porosidade (\%) = \left[1 - \left(\frac{M_d - M_s}{p_w \times V} \right) \right] \times 100 \quad (6)$$

Em que: M_d é a massa seca da amostra, em g; M_s é a massa submersa da amostra, em g; p_w é a densidade da água, em g/cm³; V é o volume da amostra, em cm³.

4.3.6 Ensaio de Resistência à compressão

A aferição de resistência à compressão foi realizada em prensa de modelo Emic DL 30000. Os procedimentos foram baseados na norma NBR 5739 (ABNT, 1994). Em que foram moldados para análise, 6 corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para cada traço 100% agregado siderúrgico, 100% agregado natural e 50% agregado siderúrgico e 50% agregado natural, totalizando 18 corpos de provas cilíndricos, após a cura submersa em água por 28 dias foi submetida à prensa de carga contínua para ruptura (Figura 18).

Figura 18 — Corpos-de-prova cilíndrico para o ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autora (2025).

O cálculo da resistência à compressão foi obtido por meio da relação entre a força aplicada ao romper-se o corpo de prova cilíndrico e a área em contato com a prensa. De acordo com a Equação 6.

$$Fck = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Em que: Fck : *Feature Compression Know* – Resistência à compressão do concreto, expressa em MPa. F : Força, expressa em N. A : Área, expressa em m^2 .

4.3.7 Ensaio de Resistência à tração na flexão

Para determinação da resistência à tração nos corpos-de-prova prismáticos foram realizadas utilizando a prensa de modelo Emic DL 30000, conforme procedimentos da NBR 12.142 (ABNT, 2010) e exemplificado na Figura 19. Os valores foram aferidos na prensa hidráulica, após 28 dias submersos em água. A norma exige que a ruptura do corpo-de-prova prismático precisa ser no terço médio ou a uma distância não superior a 5 cm, procedimento adotado no estudo.

Figura 19 — Ensaio de resistência à tração na flexão.



Fonte: Autora (2025).

O Cálculo da resistência a tração na flexão foi feito pela Equação 7.

$$F_{ct} = p.l/b.d^2 \quad (7)$$

Em que: F_{ct} : Resistência à tração na flexão (MPa); p : Carga máxima aplicada (N); l : distância entre os elementos de apoio (mm); b : largura média do corpo de prova na seção de ruptura (mm) e d : altura média do corpo de prova na seção de ruptura (mm).

4.4 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida começa com uma definição do objetivo e do escopo do estudo. O objetivo da realização da ACV neste estudo foi avaliar o impacto ambiental de cada uma das misturas analisadas, com 100% de agregado siderúrgico, 100% de agregado natural, 50% de cada agregado. As misturas foram avaliadas por meio do PaLATE, uma ferramenta de ACV adaptada especificamente para a análise de construções de pavimentos, para efeitos ambientais e econômicos, também utilizada por Aurangzeb *et al.* (2014), que estudaram a ACV híbrida para misturas de ligantes asfálticos com alto teor de pavimento asfáltico reciclado (RAP) (50%). Para Del Ponte *et al.* (2017), que analisaram os benefícios ambientais (ou seja, emissões de dióxido de carbono, consumo de energia e consumo de água) associados à substituição de materiais virgens convencionais por materiais reciclados

na construção de rodovias e Hong e Prozzi (2017) que utilizaram ACV para comparar RAP e alternativas virgens.

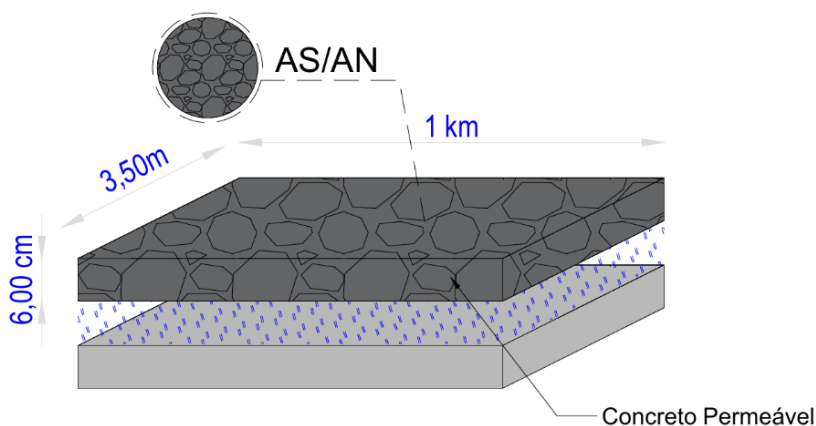
O PaLATE adota uma estrutura de modelagem robusta, capaz de representar as interações complexas entre materiais e processos construtivos, desagregando o processo de construção em tarefas específicas que servem de base para o cálculo dos impactos ambientais (Horvath, 2004).

Os resultados fornecidos abrangem tanto o inventário do ciclo de vida, incluindo consumo de energia, uso de água, emissões atmosféricas e geração de resíduos perigosos, quanto a avaliação de impacto, considerando, por exemplo, os efeitos sobre a saúde humana decorrentes da lixiviação de contaminantes e partículas em suspensão (Nathman *et al.*, 2009). Vale destacar que o PaLATE conta com uma interface de programação e usuário transparente, permitindo flexibilidade na estruturação dos modelos de ACV e na atualização das bases de dados utilizadas (Del ponte *et al.*, 2017; Nathman *et al.*, 2009).

Foram realizadas análises para avaliar, de forma abrangente, os potenciais benefícios das duas misturas de concreto permeável com agregados siderúrgicos em comparação com a mistura de referência (com agregado natural), e assim, identificar a alternativa mais sustentável do ponto de vista ambiental.

Neste estudo, a unidade funcional utilizada considerou uma faixa de 1 km de comprimento por 3,5 m de largura e 6 cm de espessura (Figura 20). As fases da avaliação do ciclo de vida consideraram a de projeto e de produção de matéria prima (ou seja, extração ou geração de materiais) e construção inicial (Equipamentos).

Figura 20 — Esquema funcional experimental



Fonte: Autora (2025).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização física, química e ambiental dos agregados naturais e siderúrgicos

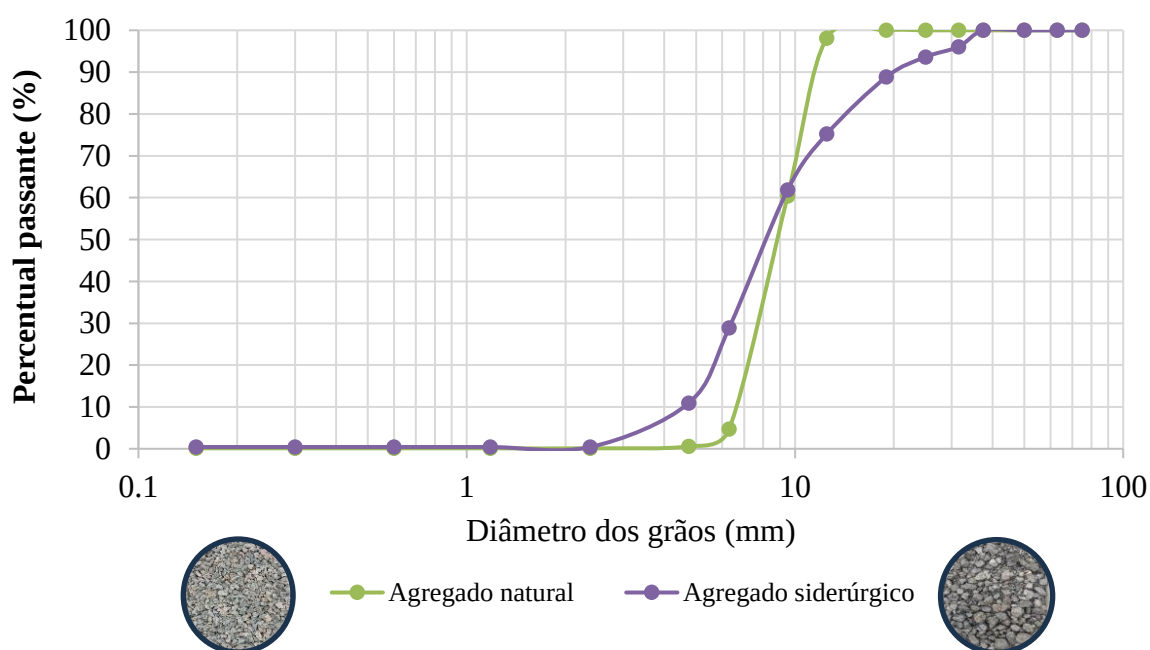
5.1.1 Análise granulométrica

A composição granulométrica dos agregados natural e siderúrgico foi determinada conforme os critérios estabelecidos pela NBR 17054 (ABNT, 2022). Verificou-se que as porcentagens acumuladas das amostras de agregados se encontram dentro da faixa de estudo entre 4,8 mm e 12,5 mm.

Adicionalmente, foram realizados ajustes na distribuição granulométrica correspondente às peneiras de 4,8 mm a 12,5 mm, com o objetivo de adequar o agregado siderúrgico ao perfil do agregado natural, representado na Figura 21.

Existem pesquisas com agregado natural, em que foram observadas que com o aumento do tamanho dos agregados entre as faixas de 4,8 mm a 12,5 mm, resulta na melhoria de resistência à compressão dos concretos permeáveis, correspondendo assim a uma correlação de mudança de porosidade de 17,9% a 20,1 % (Deo *et al.*, 2010).

Figura 21 — Composição granulométrica dos agregados



Fonte: Autora (2025)

Determinou-se a composição granulométrica referentes aos agregados natural e siderúrgico, segundo a NBR 17054 (ABNT, 2022). O resultado apresenta-se na Tabela 7.

Tabela 7 — Porcentagens retidas dos agregados

Abertura das peneiras (mm)	Porcentagem retida (%)	
	Agregado natural	Agregado siderúrgico
25,0	0,0	6,37
19,0	0,00	11,14
12,5	1,90	24,78
9,5	39,58	38,13
6,3	95,31	71,13
4,8	99,43	86,06

Fonte: Autora (2025).

Para o módulo de finura (MF) e a dimensão máxima característica (DMC) dos agregados apresentaram similaridade nos resultados dos ensaios de composição granulométrica, conforme pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 — Valores do MF, DMC e teor de material pulverulento dos agregados

Tipo de agregado		
Parâmetros	Agregado natural	Agregado siderúrgico
MF	6,38	6,36
DMC	9,5	25,0
Teor de material pulverulento (%)	0,472	1,175

Fonte: Autora (2025).

O valor encontrado para o módulo de finura do resíduo siderúrgico usados nesta pesquisa foi de 6,36 próximo aos valores observados em outros estudos, como de 6,17 obtido por Pimentel *et al.* (2023), 4,60 (Cartaxo *et al.*, 2023) e de 5,48 (Benitez *et al.*, 2020) que também incorporaram na produção de concretos sustentáveis escória de aciaria BSSF em substituição aos agregados naturais.

Quanto ao teor de material pulverulento, conforme NBR 7218, ABNT (2010) foi observado para o agregado siderúrgico, 1,18 %. Resultado similar para ambos os pesquisadores Benitez *et al.* (2020) e Cartaxo *et al.* (2023) de 1,74% de teor de material pulverulento.

5.1.2 Massa específica e absorção de água do agregado natural e siderúrgico

A massa específica e absorção de água do agregado natural e siderúrgico foram medidas segundo NBR 16.917 (ABNT, 2021). Em que, a média dos resultados obtidos encontram-se dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 — Valores de massas específicas e de absorção de água dos agregados

Característica	Agregado natural	Agregado siderúrgico
Massa específica seca (g/cm ³)	2,580	3,260
Absorção de água (%)	2,60	2,29

Fonte: Autora (2025)

Observou-se que a massa específica do agregado natural é inferior à do agregado siderúrgico. Isso se deve ao fato de que o agregado siderúrgico é originado do aço que possui uma densidade de 7,85 g/cm³, o que resulta em um aumento na massa específica do agregado siderúrgico em comparação com o agregado natural.

Esse comportamento pode ser explicado também, pela característica do agregado siderúrgico, que apresenta um aspecto rochoso, coloração escura (devido à alta presença de ferro), superfície angular e irregular, além de uma massa específica variando entre 3,3 e 3,6 g/cm³ (cerca de 30% mais pesado que os agregados naturais comuns), segundo Pimentel *et al.* (2023). Além disso, o agregado siderúrgico possui elevada dureza e porosidade, conforme estudos de Samir *et al.* (2012), Palankar *et al.* (2016) e Jiang *et al.* (2018).

Quanto aos resultados de absorção de água verificou-se maior absorção de água para os agregados naturais, em relação aos agregados siderúrgicos. Tal feito se dá devido à alta porosidade do agregado natural.

5.1.3 Massa unitária solta e compactada dos agregados e volume de vazios

A média dos resultados de massa unitária dos agregados no estado solto e compactado, obtidos com base em três determinações, encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 — Valores médios de massas unitárias solta e compactada

Resultado das características média	Agregado natural	Agregado siderúrgico
Massa unitária solta (kg/m ³)	1.320,70	1.862,56
Massa unitária compactada (kg/m ³)	1.512,47	1.904,71

Fonte: Autora (2025)

Observou-se que as massas unitárias no estado solto dos agregados siderúrgicos foram superiores às dos agregados naturais. Isso se deve à forma mais irregular dos agregados siderúrgicos e à presença de partículas com densidades maiores do que as dos grãos dos agregados graúdos, o que aumentou o volume de vazios das placas de concreto permeável produzidas com resíduos *BSSF*.

Pimentel *et al.* (2023) verificaram que os agregados siderúrgicos, apresentam maiores valores de densidade (3,61 g/cm³) e peso unitário de 1.770 kg/m³ para a escória grossa e 1.850 kg/m³ para a escória fina, em razão de serem subprodutos provenientes do aço, em comparação para a presente pesquisa o valor encontrado foi de 1.862,56 kg/m³ a massa unitária para o agregado siderúrgico *BSSF*.

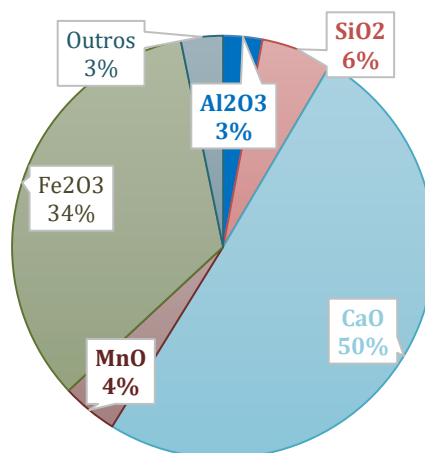
5.1.4 Fluorescência de Raio X (FRX) e Difração de Raio X (DRX)

Durante os ensaios de fluorescência de raio X, observou-se que os óxidos mais abundantes nas amostras analisadas foram o óxido de cálcio (CaO), óxido de ferro III (Fe₂O₃), dióxido de silício (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃). A soma desses óxidos totalizou 99% da composição de cada amostra, com o agregado siderúrgico apresentando aproximadamente 50% de óxido de cálcio (CaO) e 34% de óxido de ferro (Fe₂O₃). Outros elementos também estavam presentes, mas em quantidades menores. Na Figura 22 apresenta o gráfico com os compostos de maior concentração nas amostras analisadas neste estudo.

A análise de difração de raios X (DRX) foi realizada com o objetivo de complementar e identificar as fases das amostras examinadas, com base na análise de fluorescência de raios X (FRX). A partir do difratograma do agregado siderúrgico (Figura 23), foi possível

identificar a predominância dos principais elementos químicos, como carbonato de cálcio (CaO), óxido de ferro (FeO₂), ferro (Fe) e óxido de silício (SiO₂).

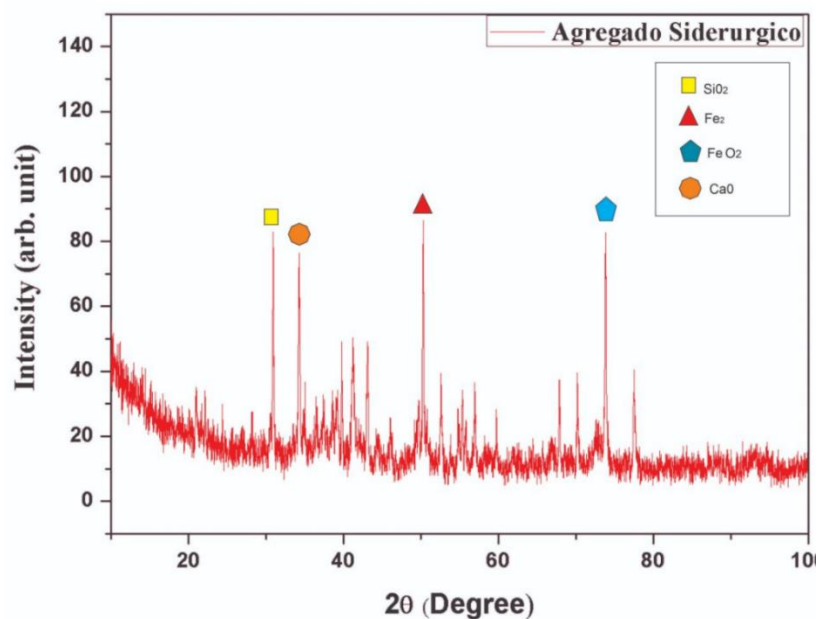
Figura 22— Representação do FRX das amostras dos agregados siderúrgicos analisados



Fonte: Autora (2025).

Tal fato foi comprovado por Jiang *et al.* (2018) e Naidu *et al.* (2020), que destacam que a escória de aciaria é composta principalmente por silicatos de cálcio, óxido de silício, ferrita cálcica, magnésia e vestígios de outros minerais com impurezas. É importante destacar também que as características químicas, mineralógicas e físicas das escórias de aciaria variam consideravelmente dependendo do processo de fabricação, método de refino do aço, das matérias-primas utilizadas e dos tratamentos de beneficiamento a que são submetidas, conforme apontado por Shi (2004) e Palankar *et al.* (2016).

Figura 23 — Difratoograma de Raio X do agregado siderúrgico



Fonte: Autora (2025).

5.2 Caracterização mecânica e hidráulica das misturas

5.2.1 Resistência à compressão

A Figura 24 apresentam os resultados de resistência à compressão obtidos após 28 dias de cura para os concretos permeáveis avaliados. Observou-se que as resistências médias à compressão foram de 8,34 MPa para o concreto 100%AS, 10,89 MPa para o concreto 100%AN e 5,37 MPa para o concreto 50%AS-50%AN. Esses valores, relativamente baixos, são típicos de concretos permeáveis, os quais apresentam elevada porosidade e, conseqüentemente, menor resistência mecânica. Os resultados obtidos situam-se próximos ao limite inferior da faixa reportada na literatura para concretos permeáveis, que varia de 4,1 MPa a 55,8 MPa, segundo Batezini *et al.* (2021).

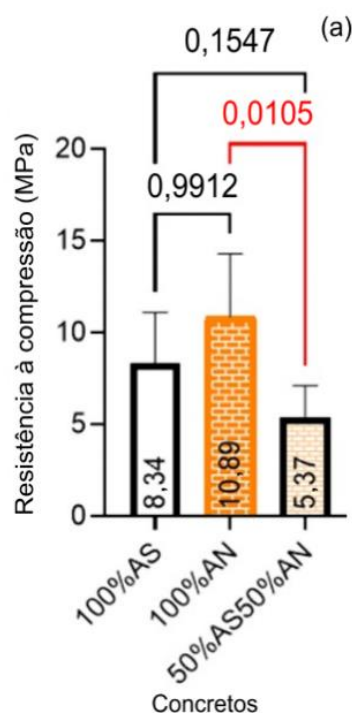
A análise estatística foi conduzida por meio do teste de Kruskal-Wallis (Kruskal and Wallis, 1952), apropriado para amostras com tamanhos reduzidos. Quando identificadas diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$), aplicou-se o teste post-hoc de Dunn para comparações múltiplas entre os grupos. Este procedimento permitiu identificar as combinações responsáveis pelas diferenças observadas, controlando o erro do Tipo I associado a múltiplas comparações (Dunn, 1964). O teste revelou diferença estatisticamente significativa entre os concretos 100%AN e 50%AS-50%AN ($p = 0,0105$), indicando redução

significativa da resistência à compressão com a adição combinada dos agregados, enquanto as demais comparações não apresentaram significância estatística.

Ferić *et al.* (2023) destaca que embora as faixas de resistência variem consideravelmente, a resistência à compressão do concreto permeável é geralmente reportada entre 2,8 e 28 MPa, enquanto as resistências à flexão variam de 1,5 a 3,2 MPa. As propriedades mecânicas do concreto permeável são influenciadas por diversos fatores, como a relação água-cimento, o grau de compactação, o volume de ligante e a granulometria do agregado.

Assim, o uso do concreto permeável é tipicamente aplicado a menores resistências à compressão, a exemplo: calçadas, estacionamentos, espaços recreativos e sub-bases para pavimentos convencionais e para material de pavimentação, em diversos países (emergentes) é limitada por falta de técnicas padronizadas para preparação e testes de materiais, como também para práticas da construção civil (Ibrahim *et al.*, 2020; Chandrappa; Biligiri., 2016).

Figura 24 — Resistência à compressão dos CP's cilíndricos



Fonte: Autora (2025).

Outros estudos indicam que o concreto permeável confeccionado com agregado siderúrgico tem melhor resistência mecânica em relação aos agregados graúdos, conforme estudos de El-Hassan *et al.* (2019). Em que a resistência à compressão é geralmente maior que 10 MPa (Brand; Roesler., 2020; Yeih *et al.*, 2015).

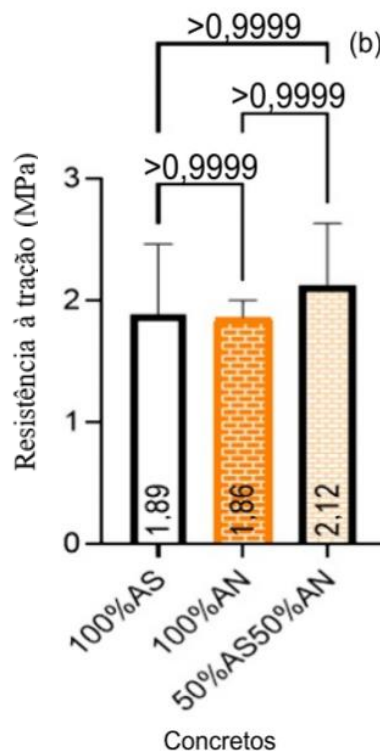
5.2.2 Resistência à tração na flexão

Em relação à resistência à tração na flexão (Figura 25), os resultados médios dos 6 prismas obtidos nos ensaios realizados aos 28 dias, para os concretos 100%AS e 100%AN apresentaram valores médios equivalentes, de 1,89 MPa e 1,88 MPa, respectivamente. Já o concreto 50%AS-50%AN pela análise estatística, não apresentou diferenças significativas entre os grupos ($p > 0,9999$ para todas as comparações). Segundo a NBR 16.416 (ABNT, 2015), para aplicações em pavimentos sujeitos ao tráfego de pedestres com espessura mínima de 6 cm, é exigida resistência à tração na flexão mínima de 2,0 MPa. Assim, apenas o concreto 50%AS-50%AN atendeu ao critério normativo, embora as diferenças não tenham sido estatisticamente significativas.

Para Strieder *et al.* (2022) destaca que valores de resistência à flexão para concreto permeável podem variar de 1,83 MPa a 2,76 MPa. Assim, segundo este critério os prismas produzidos com os traços com 100% de agregados naturais e siderúrgicos, atenderam a esse requisito de resistência à tração.

Pimentel *et al.* (2023) verificaram com lajes de concreto permeável, produzidos com agregado siderúrgico, resultados de resistência superiores ao agregado natural, com aumento de 20% a 35%, e melhor permeabilidade.

Figura 25 — Resistência à tração dos corpos-de-prova prismáticos



Segundo Shepard *et al.* (2020), pavimentos permeáveis confeccionados com agregado siderúrgico mostram melhores resultados quanto as propriedades de longa duração, a exemplo, melhor resistência à deformação permanente. Além da comparação de concreto produzidos com agregado siderúrgico exibir maiores resistências mecânicas e maior potencial hidráulico (Lang *et al.*, 2019).

5.2.3 Coeficiente de Permeabilidade

A Figura 26 apresenta os resultados do ensaio de permeabilidade dos concretos permeáveis avaliados. Os valores médios de permeabilidade foram de $2,81 \times 10^{-2}$ m/s para 100%AS, $1,45 \times 10^{-2}$ m/s para o 100% AN e $1,60 \times 10^{-2}$ m/s para 50% AS-50% AN. Todos os valores atenderam ao requisito mínimo estabelecido pela NBR 16.416 (ABNT, 2015), que exige coeficiente de permeabilidade superior a 10^{-3} m/s para concretos permeáveis aplicados em pavimentos.

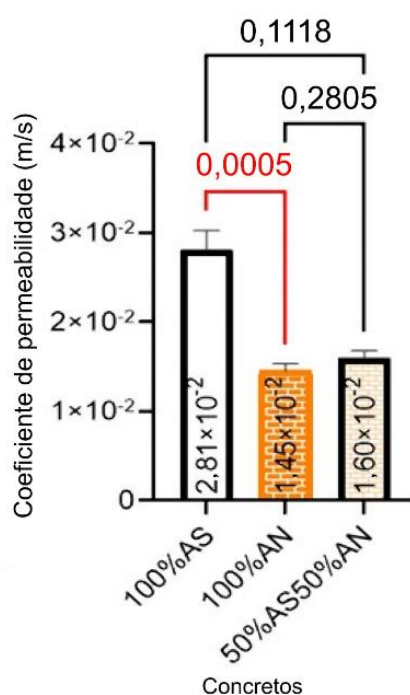
A análise estatística revelou diferença significativa entre os concretos 100% AS e 100%AN ($p = 0,0005$), indicando que a substituição do agregado siderúrgico pelo natural

resultou em redução estatisticamente significativa na permeabilidade. As comparações entre os demais pares de concretos não apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p = 0,1118$ entre 100% AS e 50% AS-50% AN; $p = 0,2805$ entre 100% AN e 50% AS-50% AN), conforme identificado por meio do teste de Dunn aplicado após detecção de significância geral pelo teste de Kruskal-Wallis.

Quanto aos valores absolutos, os coeficientes de permeabilidade encontrados estão dentro da faixa recomendada pela *Portland Cement Association* (2004), que varia entre $1,3 \times 10^{-6}$ m/s e $12,2 \times 10^{-3}$ m/s, além de estarem em consonância com os resultados obtidos por outros autores, como Pimentel *et al.* (2023) que obtiveram valor médio de $2,36 \times 10^{-3}$ m/s, reforçando a adequação hidráulica dos concretos permeáveis desenvolvidos neste estudo.

Lang *et al.* (2019) verificaram coeficiente de permeabilidade maior em concretos produzidos com agregados siderúrgicos comparativamente aos com agregados naturais, variando entre $5,85 \times 10^{-3}$ m/s a $7,10 \times 10^{-3}$ m/s. Tennis (2004) também destaca que a permeabilidade do concreto permeável, devido à sua alta porosidade, deve se situar na faixa de 2×10^{-3} m/s a 6×10^{-3} mm/s.

Figura 26 — Coeficiente de permeabilidade das placas



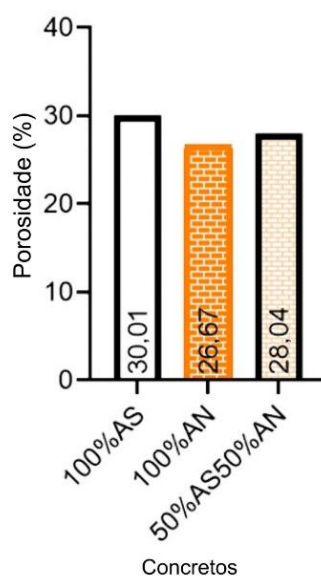
Fonte: Autora (2025).

5.2.4 Porosidade

No que se refere à porosidade (Figura 27), os valores foram de 30% para o concreto com 100% AS, 27% para o com 100% AN e 28% para o traço com agregados mistos. Todos os concretos apresentaram porosidades dentro da faixa estabelecida pela norma ACI 522R (2010), que recomenda valores entre 15% e 35% de porosidade para concretos permeáveis. A semelhança dos valores obtidos entre os grupos sugere que a substituição parcial ou total dos agregados naturais por resíduos siderúrgicos não comprometeu a estrutura porosa do concreto. Isso pode ser atribuído, em parte, à forma irregular dos grãos de ambos os tipos de agregados, que favorece a manutenção da conectividade entre os vazios.

A semelhança entre os grupos em relação à porosidade (Figura 27) reforça a ideia de que as alterações nas propriedades hidráulicas observadas se devem a fatores adicionais à porosidade total, como a conectividade dos poros ou o empacotamento dos agregados.

Figura 27 — Valores da porosidade de cada traço confeccionado



Fonte: Autora (2025).

Estudos apontam que a porosidade da placa de concreto permeável é geralmente maior nos agregados siderúrgicos em torno de 15% em comparação aos agregados graúdos

(Brand; Roesler., 2020; Yeih *et al.*, 2015), em que dependem do tipo de cimento, escória, condição de cura e gradação (Yeih; Chang., 2019).

Como a resistência do concreto permeável depende principalmente da porosidade, o desempenho estrutural é mais variável que no concreto tradicional. Como já citado, o uso desse tipo de concreto é restrito a aplicações de menor resistência, a exemplo, calçadas, estacionamentos e espaços recreativos (Chandrappa; Biligiri, 2016).

Há estudos também desenvolvidos em concreto permeável utilizando agregado siderúrgico, em que podem eliminar o problema da poluição sonora, aos quais é uma grande preocupação ambiental atribuída à sua maior porosidade, mostrado de fato nos resultados no ensaio obtido, em comparação ao agregado natural (Rios *et al.*, 2019).

5.3 Avaliação do Ciclo de Vida

Os resultados relativos aos impactos ambientais da mistura de referência (100% de agregados naturais) foram comparados às duas misturas com 100% de agregado siderúrgico *BSSF* e 50% de cada agregado. Na Figura 28 é apresentada a diferença percentual entre as misturas e traço de referência, quanto ao consumo de energia (MJ), consumo de água (kg), dióxido de carbono (Mg), emissão de óxidos de Nitrogênio (kg), material particulado (kg), emissão de dióxido de enxofre (kg) e emissão de monóxido de carbono (kg).

Os resultados apresentados na Figura 28 evidenciam impactos ambientais contrastantes decorrentes da substituição de agregados naturais por agregado siderúrgico de escória de aciaria pelo processo *BSSF*, em que a ACV aponta benefícios ambientais das misturas com agregado siderúrgico nos indicadores relacionados ao consumo de energia e de água, dióxido de carbono (CO_2), emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e de dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO) e material particulado (PM_{10}).

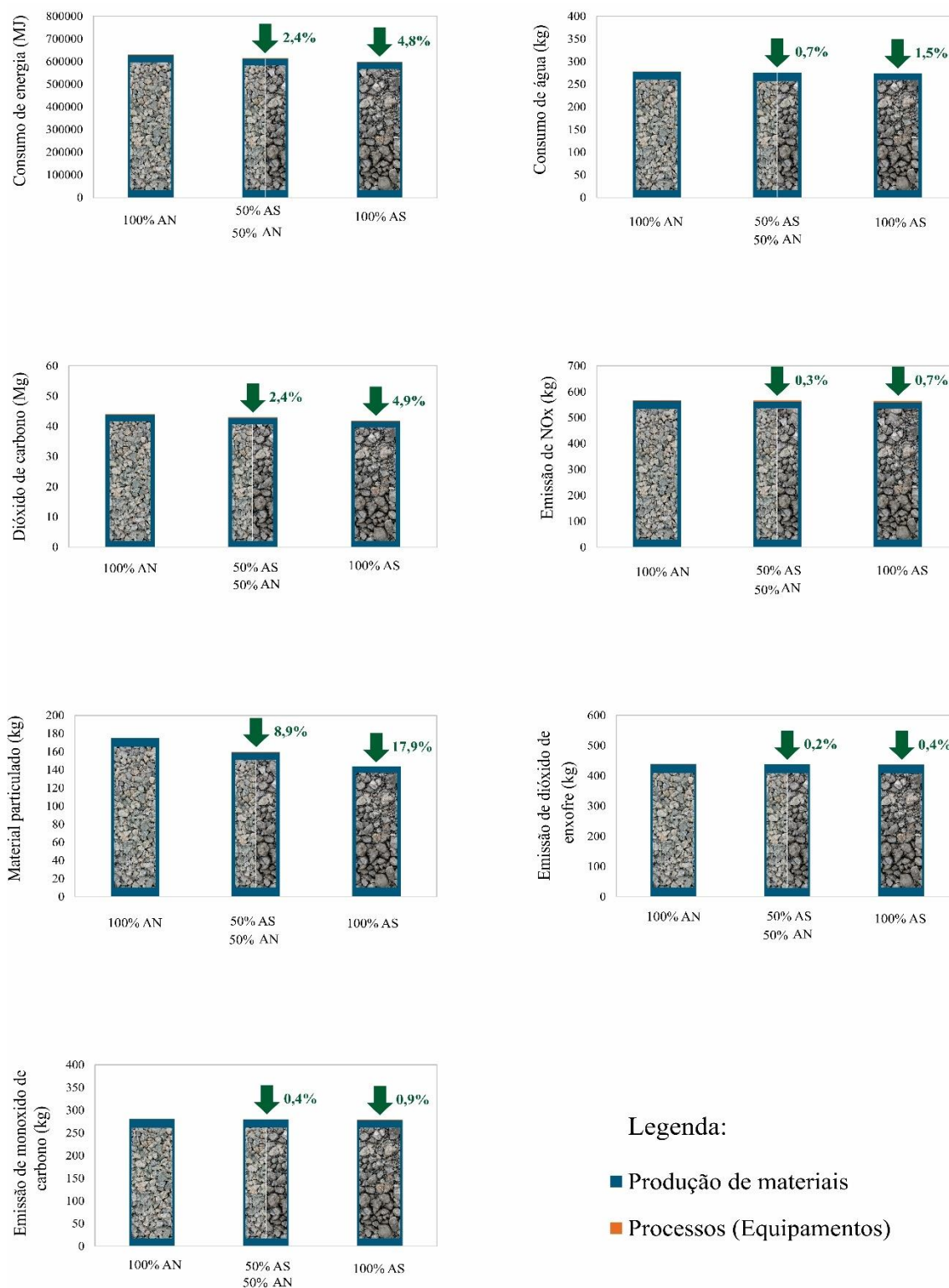
Observou-se redução nos impactos ambientais associados ao consumo de energia e água durante a produção dos materiais. Para as misturas contendo 50% e 100% de agregado siderúrgico, registraram-se reduções de 2,4% e 4,8% no consumo energético, e de 0,7% e 1,5% no consumo hídrico, respectivamente, em comparação com a mistura de referência.

Os resultados demonstram reduções progressivas nas emissões conforme aumenta a taxa de substituição dos agregados. Destacam-se as quedas expressivas para PM_{10} (até 17,9%), seguidas por reduções moderadas para as emissões de CO_2 (4,9%) e NO_x (0,7%), enquanto as emissões de SO_2 e CO apresentaram reduções menos significativas, inferiores a

1%. Este padrão sugere que a substituição por agregados siderúrgicos impacta diferencialmente os diversos poluentes atmosféricos.

Embora alguns indicadores apresentem apenas reduções modestas nas emissões de gases em comparação ao uso exclusivo de agregados naturais, as misturas com agregados siderúrgicos ainda se mostram uma alternativa viável e ambientalmente vantajosa. A incorporação deste resíduo industrial, a escória de aciaria, promove a valorização de um coproduto que, em outras circunstâncias, seria destinado a aterros, além de reduzir a extração de recursos naturais não renováveis. O uso de agregados siderúrgicos pode gerar um impacto ambiental cumulativo relevante, particularmente em relação às emissões evitadas no processo de produção da mistura de referência. Portanto, mesmo reduções pontuais podem representar benefícios expressivos para a sustentabilidade da cadeia produtiva da construção civil, reforçando o potencial de materiais alternativos na promoção de práticas mais circulares e na mitigação das mudanças climáticas.

Figura 28 — ACV: (a) consumo de energia e (b) água, (c) emissões de dióxido de carbono, CO₂, (d) emissões de óxidos de nitrogênio, NO_x, (e) material particulado, (f) emissão de dióxido de enxofre e (g) emissão de monóxido de carbono, de para os 3 concretos (100% AS, 100% AN e 50% AS-50% AN)



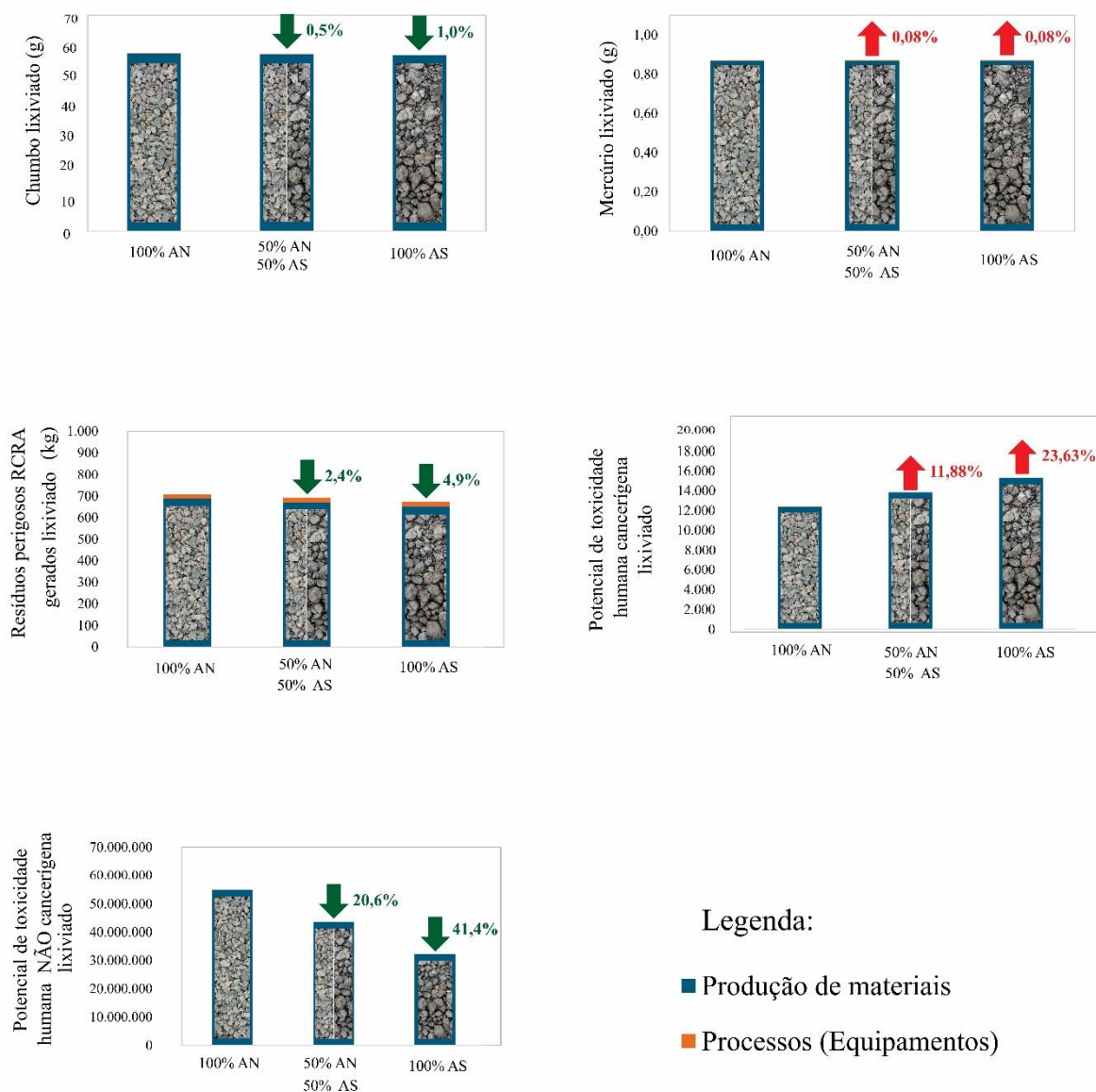
Fonte: Autora (2025)

Na Figura 29 são exibidos os resultados da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) quanto à geração de resíduos perigosos, incluindo as massas de chumbo e mercúrio lixiviados (g), os resíduos perigosos RCRA (Resource Conservation and Recovery Act/ Lei de Conservação e Recuperação de Recursos) lixiviados (kg), (Human Toxicity Potential for carcinogenic) / Potenciais de toxicidade humana cancerígena (HTP-C) e não cancerígena (HTP-NC), avaliados por meio do método PaLATE para quantificar os impactos ambientais associados aos processos de materiais e ao uso de equipamentos.

Na etapa de produção de materiais, constatou-se reduções significativas nos impactos ambientais, quanto à lixiviação de metais, as misturas com agregado siderúrgico mostram leve redução na liberação de chumbo, enquanto para o mercúrio, os impactos foram similares aos do concreto convencional, com diminuições de 0,5% e 1,0% na lixiviação de chumbo, e de 20,6% e 41,4% no potencial de toxicidade humana não cancerígena (HTP-NC), respectivamente para misturas com 50% e 100% de agregado siderúrgico. Adicionalmente, observou-se reduções de 2,4% e 4,9% na geração de resíduos perigosos RCRA para os mesmos níveis de substituição (50% e 100%). Em contrapartida, o mercúrio lixiviado registrou um incremento de 0,08% em ambas as misturas com agregado siderúrgico (50% e 100%) quando comparado à mistura de referência com agregado natural, mantendo-se em níveis equivalentes entre as duas formulações alternativas.

A análise de contribuição demonstrou que o mercúrio lixiviado e o potencial de toxicidade humana cancerígena (HTP-C) nos processos de produção de materiais e equipamentos foram os principais contribuintes para os impactos ambientais observados, sendo que, na produção do concreto permeável, o mercúrio representou aproximadamente 0,08% do impacto total para ambas as formulações (50% e 100% de agregado siderúrgico), enquanto o HTP-C contribuiu com 11,88% e 23,63% do impacto ambiental nas misturas com 50% e 100% de agregado siderúrgico, respectivamente, destacando-se como o parâmetro de maior relevância.

Figura 29 — ACV para os materiais lixiviados, chumbo (a) e mercúrio (b), resíduos perigosos na produção (c) e potencial de toxicidade humana, cancerígena (d) ou não cancerígena (e) de materiais e processos de equipamento quanto aos 3 concretos.



Fonte: Autora (2025)

Resultados semelhantes podem ser encontrados nos estudos de Aurangzeb *et al.*, (2014); Del Ponte *et al.* (2017) e Hong e Prozzi, (2017), que assim como identificado no presente trabalho, esses estudos também apontaram que a fase de extração e produção de materiais e equipamentos apresentou desempenho equivalente, sendo igualmente reconhecida como a principal etapa contributiva. No trabalho de Aurangzeb *et al.* (2014) verificaram uma redução de 28% no consumo de energia e emissões atmosféricas com a introdução da substituição do RAP as misturas virgens, considerando apenas a camada de revestimento asfáltico. Para pesquisa de Del Ponte *et al.* (2017) verificaram benefícios ambientais, ou seja, redução nas emissões de dióxido de carbono, consumo de energia e consumo de água, associados à substituição de materiais virgens convencionais por materiais reciclados na construção de rodovias, em que analisou o impacto econômico, comparando os preços unitários de materiais virgens e reciclados, revelando economias ambientais e financeiras significativas em todos os estados-membros. Conclui-se que a economia ambiental obtida com o uso de materiais reciclados equivale ao consumo anual de energia de 110.000 residências norte-americanas, ao uso de 9.300 banheiras de água e às emissões de dióxido de carbono geradas por 58.000 automóveis em um ano. Já a economia econômica total em todo o sistema, decorrente da substituição por materiais reciclados, foi estimada em aproximadamente US\$ 62,5 milhões. Por fim, segundo análise de Hong e Prozzi, (2017), com base em dados de pavimentos construídos com 35% de RAP e comparados com misturas convencionais avaliaram de forma abrangente a sustentabilidade do RAP sob três perspectivas: econômica, energética e ambiental. A ACV conduzida pelos autores focou no consumo de energia e nas emissões de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Os resultados indicaram que os benefícios ambientais e energéticos estão diretamente associados à redução da demanda por agregados naturais e à menor intensidade de processos e equipamentos na produção do novo concreto asfáltico.

6. CONCLUSÃO

Nesta pesquisa, avaliou-se o comportamento mecânico, hidráulico e ambiental de concretos permeáveis produzidos com substituição parcial (50%) e total (100%) de agregados naturais por agregados siderúrgicos provenientes do processo *Baosteel's Slag Short Flow (BSSF)*.

Quanto à resistência mecânica avaliada a partir dos valores de tração na flexão, apenas a mistura com 50% de agregado siderúrgico atendeu (2,12 MPa) ao valor mínimo exigido pela NBR 16.416 (ABNT, 2015) de 2 MPa. Os traços com 100% de agregado natural e 100% de agregado siderúrgico apresentaram valores de 1,89 MPa, ficando abaixo do exigido para aplicações com tráfego de pedestres, especialmente em espessuras de 6 cm. Apesar disso, as diferenças entre os grupos não foram estatisticamente significativas, conforme análise pelo teste de Dunn.

Quanto ao comportamento hidráulico, o concreto com 100% de agregado siderúrgico apresentou o coeficiente de permeabilidade de $2,81 \times 10^{-2}$ m/s e porosidade de 30%, superando as misturas com 50% ($1,60 \times 10^{-2}$ m/s; 28%) e 100% de agregado natural ($1,45 \times 10^{-2}$ m/s; 26%). Todas as composições atenderam ao critério da NBR 16.416 (ABNT, 2015), que exige coeficiente de permeabilidade superior a 10^{-3} m/s. O concreto com 100% de agregado siderúrgico apresentou diferença estatisticamente significativa em relação ao concreto com 100% de agregado natural, indicando influência relevante do tipo de agregado na condutividade hidráulica. As porosidades também estão de acordo com os limites recomendados pela ACI 522R (2010) para aplicações em áreas com tráfego leve de pedestres, como calçadas, jardins, tampas de valas e bueiros.

A ACV demonstrou que a incorporação de escória de aciaria reduz impactos ambientais associados à produção dos concretos, abrangendo categorias como consumo de energia e água, emissões de CO₂, material particulado e geração de resíduos.

Em relação ao potencial de toxicidade humana (HTP), os resultados foram contrastantes entre as subcategorias. Para a subcategoria cancerígena (HTP-C) observou-se aumento nos impactos de 11,88% e 23,63%, para as misturas com 50% e 100% de agregado siderúrgico, respectivamente. Em contrapartida, na subcategoria não cancerígena (HTP-NC), registrou-se expressivas reduções nos impactos de 20,6% e 41,4%, respectivamente, para as mesmas misturas.

Quanto à lixiviação de metais, as misturas com agregado siderúrgico mostram leve redução na liberação de chumbo, enquanto para o mercúrio, os impactos foram similares aos do concreto convencional.

Diante desses resultados, conclui-se que o concreto permeável com 100% de agregado siderúrgico oferece o melhor desempenho hidráulico e os menores impactos ambientais gerais. No entanto, considerando o critério de resistência mecânica, recomenda-se a mistura com 50% de agregado siderúrgico, que equilibra o desempenho estrutural, hidráulico e a sustentabilidade ambiental.

RECOMENDAÇÕES

Adotar metodologia para processo de adensamento do concreto permeável, a ser utilizado por haste de compactação, devido a não colmatação da peça confeccionada.

Na composição granulométrica para concreto permeável tomar como base o beneficiamento dos agregados reciclados com a mesma faixa granulométrica do agregado natural.

Importante o uso de máscara facial PFF2 e luva estéril látex na separação do material, por conter muito material fino no beneficiamento dos agregados siderúrgicos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – **ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete**. ACI 522R, Farmington Hills, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1754 / C1754M**: Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete. West Conshohocken, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. 1.ed. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2. ed. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 3.ed. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto: Especificação. 2. ed. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland: Determinação de resistência à compressão. 2. ed. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. 2. ed. Rio de Janeiro, 2010

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781**: Peça de concreto para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio. 2. ed. Rio de Janeiro: 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto: Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. 2. ed. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: Solo: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. 2. ed. Rio de Janeiro, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14040**: Gestão Ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estrutura. 2. ed. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto: Requisitos e procedimentos. 2. ed. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917**: Agregado graúdo: Determinação da densidade e da absorção de água. 1.ed. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados: Determinação da massa unitária e do índice de vazios. 1.ed. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973**: Agregados: Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. 1.ed. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados: Determinação da composição granulométrica: Método de ensaio. 1.ed. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO MUNDIAL DO AÇO. **Produção do aço 2024**. Disponível em: <http://Siderurgia - worldsteel.org>. Acesso em: 29 jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE ESCÓRIA. **Aplicações e tipos de produtos**. Disponível em: http://www.nationalslag.org/archive/gen_info_sheet.pdf. Acessado em 29 de maio de 2025.

ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005. 162 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2005.

AURANGZEB, Q., AL-QADI, I., OZER, H., & YANG, R. Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. **Resources, Conservation and Recycling**, v.83, p. 77–86, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.004>

AMANCIO, F. A.; LIMA, D. A.; DIAS, A. R. O.; MESQUITA, E. F. T.; CABRAL, A. E. B. Propriedades mecânicas de argamassas com substituição da areia natural por escória de aciaria *BSSF (baosteel's slag short flow)*. **Matéria**, v. 25, n. 1, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0887>

ANTUNES, L. N.; GHISI, E.; SEVERIS, R. M. Environmental assessment of a permeable pavement system used to harvest stormwater for non-potable water uses in a building. **Science of the Total Environment**, Elsevier B.V., v. 746, p. 141087, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141087>

ASRES, E.; GHEBRAB, T.; EKWARO-OSIRE, S. Framework for Design of Sustainable Flexible Pavement. **Infrastructures**, v. 7, p. 6, 2021. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7010006>

ARAÚJO, P. R.M; CARLOS, E. M.; GOLDENFUM, J. A.; TUCCI, C. E. M. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p.21 – 29, jul./set. 2000. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v5n3.p21-29>

AZEVEDO, F. S.; SILVA, G. J. A.; SILVEIRA, J. A. R.; BARROS, F. M. N. M. B. Simulação hidrológica de biorretenção: análise de eficiência de técnicas compensatórias para mitigar impactos da urbanização. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, p. 1077-1088, 2022. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200349>

AZARIJAFARI, H.; YAHIA, A.; BEN AMOR, M. Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2187–2197, 2016.

BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto permeáveis: uma visão ambiental da tecnologia emergente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2020, 175 p. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003096132>. Acesso em: 03 mar. 2025.

BATEZINI, R.; BALBO, J. T.; HASELBACH, L.; CURVO, F. O.; KALLEDER, G. N.; SATO, B.S.; ZEMA, D. Experimental appraisal for characterizing laboratorial and field performance parameters of pervious concrete pavement. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 177-194, abr./jun. 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000200520>

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-19072013-155819/>. Acesso em: 04 mar. 2025.

BALBO, J. T.; ONO, B. W.; CARGNIN, A. P. Análise da capacidade de infiltração em pavimentos permeáveis de bloco de concreto unidirecionalmente articulado. **Revista Transportes**. v.25. n.3. 2017. <https://doi.org/10.14295/transportes.v25i3.1314>

BALAGUERA, A.; CARVAJAL, G. I.; ALBERTÍ, J.; FULLANA-I-PALMER, P., Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 132, p. 37 - 48, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.003>.

BRASIL, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução 313, de 29 de outubro de 2002**. Dispõe sobre o inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Brasília, DF, 2002.

BRAND, A. S.; FANIJO, E. O. A Review of the Influence of Steel Furnace Slag Type on the Properties of Cementitious Composites. **Applied Sciences**, v. 10, n. 22, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10228210>

BENITTEZ, L. H. **Utilização de escória de aciaria na fabricação de blocos de concreto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12909>. Acesso em: 11 mar. 2025.

BLEICHER, L.; SASAKI, J. M. **Introdução à difração de raios-x em cristais.** Universidade Federal do Ceará, p.1-20. 2000.

BLOOM, E.F; DEL PONTE, K.; NATARAJAN, B.M; AHLMAN, A.P; EDIL, T.B; WHITED, G. State DOT Life Cycle Benefits of Recycled Material in Road Construction. **Proceedings of the Geo-Chicago**, pp. 693–703, 2016.

BHATT, A.; BRADFORD, A.; ABBASSI, B. E. Cradle-to-grave life cycle assessment (LCA) of low-impact-development (LID) technologies in southern Ontario. **Journal of Environmental Management**, Elsevier, v. 231, p. 98-109, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.033>

CARTAXO, F. M.; FERREIRA, F. G. S.; FREITAS, K. M. G.; NASCIMENTO, L. C.; GUILGE, M. S.; ZANETTI, C. Propriedades mecânicas de concretos sustentáveis com incorporação de escória de aciaria *BSSF* em substituição aos agregados naturais. **Revista Principia**, v. 60, n. 4, p. 1413–1433, 2023. <https://doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6647>

CAPITÃO, S.D.; PICADO-SANTOS, L.G; MARTINHO, F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 1016 – 1024, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038>

CHAN, C. N.; VANCHAI, S.; THANED, S.; PONGRID, K. & PRINYA, C. Mechanical properties, thermal conductivity, and sound absorption of pervious concrete containing recycled concrete and bottom ash aggregates. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22, n. 4, p. 1369-1376, 2018. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-017-0144-6>

CHANG, J. J.; YEIH, W. The influences of cement type and curing condition on properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 813-820, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.178>

CHANG, J.; YEIH, W.; CHUNG, T.; HUANG, R. Properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag and alkali-activated slag cement. **Construction and Building Materials**. v.109, p. 34-40, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.049>

CHEN, X.; WANG, G.; DONG, Q.; ZHAO, X.; WANG, Y. Microscopic characterizations of pervious concrete using recycled Steel Slag Aggregate. **Journal of Cleaner Productions**, v. 254, p. 120149, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120149>

CHANDRAPPA, A.K.; BILIGIRI, K.P. Pervious concrete as a sustainable pavement material– research findings and future prospects: a state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 262–274, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054>

CHEN, Y.; KEJIN, W.; XUHAO, WANG.; WENFANG, Z. Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 97-104, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.006>

CHEN, J. C.; R. WANG. H.; ZHANG. L.; CHEN. X.; DU, Y. Alleviating urban heat island effect using high-conductivity permeable concrete pavement. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117722>

CHEN, X.; GUOTONG, W.; QIAO, D; XIAO, K. Z.; YANG, W. Microscopic characterizations of pervious concrete using recycled Steel Slag Aggregate. **Journal of Cleaner Productions**, v. 254, p. 120149, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120149>

COMPANHIA SIDERÚRGICA DO PECÉM. **Produtos e co-produtos**. Disponível em: Relatório de Sustentabilidade 2023 | ArcelorMittal/. Acesso em: 18 out. 2025.

COSTA, J. O.; BORGES, P. H.R.; SANTOS, F. A. D.; BEZERRA, A. C. S.; BERGH, W.V. D.; BLOM, J. Cementitious binders and reclaimed asphalt aggregates for sustainable pavement base layers: Potential, challenges and research needs, **Construction and Building Materials**, v. 65, p.120325, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120325>.

COSTA, L. I. O. 2023. 144 f. **Análise da viabilidade técnica e ambiental da utilização do agregado siderúrgico Baosteel Slag Short Flow (BSSF) na estabilização de solos**. Dissertação (Mestrado em Programa de Tecnologia em Gestão Ambiental) – Departamento de Construção Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2023.

CORSO, M.; SILVEIRA, D. E. A.; ALVES, G. H.; BERTO, L. K.; ALBUQUERQUE, A. C. L.; REZENDE, H. LUCIANA. C. S. **Incorporação de resíduos de vidro em concreto permeável**. XI EPCC Encontro Internacional de Produção Científica, 2019.

CHURCH, S. Exploring Green Streets and Rain Gardens as Instances of Small Scale Nature and Environmental Learning Tools. **Landscape and Urban Planning**, v. 134, p. 229–240, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.021>

COSTA, F. B.P.; LORENZI, A.; HASELBACH, L.; FILHO, L.C.P. Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 11, n. 5, p. 1151 – 1159, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000500013>

DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. Pervious concrete as an alternative pavement strategy: a state-of-the-art review. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 21, n. 12, p. 1516-1531, 2020. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1554217>

DEO, O., NEITHALATH, N. Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features. **Materials Science and Engineering**, p. 402–412, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.024>.

DEL PONTE, K.; MADRAS NATARAJAN, B.; PAKES AHLMAN, A.; BAKER, A.; ELLIOTT, E.; EDIL, T.B. Life-Cycle Benefits of Recycled Material in Highway Construction, **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2628, p. 1–11, 2017. <https://doi.org/10.3141/2628-01>

DING, X. *et al.* Laboratory investigation of the recycled asphalt concrete with stable crumb rubber asphalt binder. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 552–557, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.114>

DUNN, O. J. (1964). Multiple comparisons using rank sums. **Technometrics**, 6(3), 241–252. DOI: 10.2307/1266041

EL-HASSAN, H., KIANMEHR, P., ZOUAOU, S. Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 164–175, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.325>

ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY. **Storm Water Technology Fact Sheet, Porous Pavement**. EPA 832-F-99 023 Office of Water, Washington, D.C. 1999

FERGUSON, B. **Porous Pavements** (1st ed.), 2005. <https://doi.org/10.1201/9781420038439>

FERIĆ, K.; VEERAPPAN, S.; ROMIĆ, A.; GOTOVAC, H. Effect of Aggregate Size and Compaction on the Strength and Hydraulic Properties of Pervious Concrete. **Sustainability** **2023**, v. 15(2), p. 1146, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15021146>

GADSBY, A.; TSAI, J. Comparação do impacto ambiental da nova microfresagem e revestimento fino e fresagem convencional para preservação sustentável de pavimentos. **International Journal of Pavement Research and Technology**. v. 14, p. 23–29, 2020.

GHAFOORI, N.; DUTTA, S. Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for paving materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.7, n. 3, p. 183 - 191, 1995. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1995\)7:3\(183\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1995)7:3(183))

GONÇALVES, A. B.; OLIVEIRA, R. H. **Pavimentos Permeáveis e sua Influência sobre a Drenagem: Seminários. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.**

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. 2014, 12 p. Disponível em:

<https://pt.scribd.com/document/338906103/Pavimentos-Permeaveis-e-Sua-Influencia-Sobre-a-Drenagem>. Acesso em: 10 abr. 2025.

GONG, C.; WANG, Y.; PENG, Y.; DING, W.; LEI, M.; ZHIHUA, D.; SHI, C., Three-dimensional coupled hydromechanical analysis of localized joint leakage in segmental tunnel linings, **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 130, p. 104726, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104726>.

GESOĞLU, M.; GÜNEYISI, E.; KHOSHNAW, G; İPEK, S. Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. **Construction and Building Materials**, v. 63, p. 206 – 213, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.046>

HÄKKINEN, T.; Mäkelä, K. Environmental impact of concrete and asphalt pavements. Research Notes 1752. **Finland: Technical Research Centre of Finland**, 1996.

HONG, F.; PROZZI, J.A. Evaluation of recycled asphalt pavement using economic, environmental, and energy metrics based on long-term pavement performance sections. **Road Materials and Pavement Design**, v. 19(8), p. 1816 –1831, 2017. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1348306>

HORVATH, A. A Life Cycle Analysis Model and Decision Support Tool for Selecting Recycled Versus Virgin Materials for Highway Applications, **RMRC Research Project Final Report**, v. 23, University of, 2004.

HORVATH, A.; HENDRICKSON, C. Comparison of Environmental Implications of Asphalt and Steel-Reinforced Concrete Pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1626, 105-113, 1998. <https://doi.org/10.3141/1626-13>

HUNT, R.G., FRANKLIN, W.E. LCA — How it came about – Personal reflections on the origin and the Development of LCA in the USA, P. 4–7, 1996. <https://doi.org/10.1007/BF02978624>

HUANG, B.; WU, H.; SHU, X.; BURDETTE, E.G. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 818-823, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.025>

HUANG, L.; KRIGSVOLL, G.; JOHANSEN, F.; LIU, Y.; ZHANG, X. Carbon emission of global construction sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1906-1916, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.001>

INSTITUTO AÇO BRASIL(IABR). **Folder Aço Brasil Sustentabilidade**. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em:INSTITUCIONAL_digital_2024.cdr. Acesso em: 18 fev. 2025.

IBRAHIM, H. A.; RAZAK, H. A. Effect of palm oil clinker incorporation on properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 70-77, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.181>

IBRAHIM, H. A. *et al.* Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 253, p. 119251, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119251>

JIANG, Y. *et al.* Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 187-197, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.023>

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 102 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. <https://doi.org/10.11606/T.3.2000.tde-27072022-082553>

KAZI, M. A. S.; KHALIFA, A.; ANWAR, A. H. Properties of pervious concrete made with different types of waste aggregate: A literature review. **IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.** **1289** 012077, 2023. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1289/1/012077>

KEVERN, J.T.; SCHAEFER, V.R.; WANG, K. Evaluation of pervious concrete workability using gyratory compaction. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.21, p. 764–770, 2009a. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:12\(764\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:12(764))

KEVERN, J.T; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. Temperature bahaviour of pervious concrete systems. transportation research record: **Journal of the Transportation Research Board**, v.2098, p. 94-101, 2009b. <https://doi.org/10.3141/2098-10>

KIM, S.; LEE, S.-W.; LEE, J.; AN, K. Exploring the Relationship between Prior Knowledge on Rain Gardens and Supports for Adopting Rain Gardens Using a Structural Equation Model. **Sustainability**, v. 10, p. 1500, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10051500>

KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. **Journal of the American Statistical Association**, 47(260), 583–621. DOI: 10.1080/01621459.1952.10483441.

KUO,W-T; LIU, C-C; SU, D-S. Use of washed municipal solid waste incinerator bottom ash in pervious concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 328-335, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.001>

LANG, L.; DUAN, H.; CHEN, B. Properties of pervious concrete made from steel slag and magnesium phosphate cement. **Construction and Building Material**, v. 209, p. 95-104, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.123>

LEE, M.-G.; WANG, W.-C.; WANG, Y.-C.; HSIEH, Y.-C.; LIN, Y.-C. Mechanical properties of high-strength pervious concrete with steel fiber or glass fiber. **Buildings**, v. 12, p. 620, 2022. <https://doi.org/10.3390/buildings12050620>

LEE, J.; EDIL, T.B; BENSON, C.H; TINJUM, J.M. Building Environmentally and Economically Sustainable Transportation Infrastructure: Green Highway Rating System. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 139, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000742](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000742)

LEE, J.; EDIL, T.; BENSON, C.; TINJUM, J. Use of BE2ST on Highways for Green Highway Construction Rating in Wisconsin. **Em Proceedings of the Green Streets and Highways**, pp. 480 – 494, 2010.

LIMA, M. S. et al. Influência do resíduo de construção e demolição como agregado na produção de concreto para pavimentos permeáveis. **Revista Princípio**, v. 62, 2025. <https://doi.org/10.18265/2447-9187a2024id8566>

LIU, J.; LI, H.; WANG, Y.; ZHANG, H. Integrated life cycle assessment of permeable pavement: Model development and case study. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Elsevier, v. 85, n. 102381, ago. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102381>

LU, G.; WANG, Y.; LI, H.; WANG, D.; OESER, M. The environmental impact evaluation on the application of permeable pavement based on life cycle analysis. **International Journal of Transportation Science and Technology**, Tongji University, v. 8, n. 4, p. 351-357, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2019.05.006>

LIMA, M. S. 2020, 107 f. **Análise de características mecânicas e hidráulicas de pavimentos permeáveis produzidos com agregados naturais e reciclados**. Dissertação (mestrado) – Instituto Federal de Educação, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2020.

MAAWALI, M.S.; REDDY, N.S; AL-HATALI. A. study on mechanical properties of porous concrete for its use in low traffic volume roads and parking areas in muscat. **International Journal of Civil Engineering**, v. 4, 2017. <http://dx.doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V4I5P110>

MARTINS VAZ, I. C.; GHISI, E.; THIVES, L. P. Life cycle energy assessment and economic feasibility of stormwater harvested from pervious pavements. **Water Research**, Elsevier Ltd, v. 170, p. 115322, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115322>

MAURO, R.; GUERRIERI, M. Comparative life-cycle assessment of conventional (double lane) and non-conventional (turbo and flower) roundabout intersections. **Transportation Research. Parte D: Transport and Environment**, v. 48, p. 96 – 111, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.011>

MARCHIONI, M. L; BECCIU, G. Permeable pavement used on sustainable drainage systems (SUDs): a synthetic review of recent literature. **WIT Press Urban Water II**, 2014. DOI: 10.2495/UW140161

MERIGHI, J. V.; FORTES, R. M.; BANDEIRA, A. Estudo de propriedades do concreto poroso aplicado a pavimentação. **IBRACON, Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo - SP, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265036868_study_of_the_bond_strength_in_the_interface_of_porous_concrete_and_portland_cement_concrete. Acesso em: 02 mar. 2025.

MEDDAH, M.S.; AL, O. M.; HAGO, A.W.; AL, J, K. Effect of recycled aggregates on previous concrete properties. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, v. 603, 2019. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/603/3/032010>

MELANTA, S.; MILLER-HOOKS, E., AVETISYAN, H.G. Carbon Footprint Estimation Tool for Transportation Construction Projects. **Journal of Construction Engineering and Management**. v. 139, p. 547–555, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000598](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000598)

MEHMET, G. Y.; ERHAN, G.; GANJEENA, K. S. Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. **Construction and Building Materials**, v. 63, p. 206 – 213, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.046>

MIKAMI, R.J.; KRUGER, P.; PEREIRA, E.; KUMMER, A.C.B.; DÖLL, M.M.R. Influence of the red ceramic theory of recycled aggregate on the properties of pervious concrete. **Revista Matéria**, v.23, n.3, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0497>

MONK, E.; CHALMERS, L. **Mimic natural drainage processes: A Practical Approach for Stormwater Management in Western Australia**. In Proceedings of the 1st National Hydropolis Conference Burswood Convention Centre Perth, Canberra, Australia, 8–11 October 2006. Disponível em: https://www.water.wa.gov.au/__data/assets/pdf_file/0018/5148/89891.pdf. Acesso em: 10 abr. 2025.

NGUYEN, D. H.; BOUTOUIL, M.; SEBAIBI, N.; LELEYTER, L.; BARAUD, F. Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 151-60, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.017>

NAIDU, T. S.; SHERIDAN, C. M.; VAN DYK, L. D. Basic oxygen furnace slag: review of current and potential uses. **Minerals Engineering**, v. 149, p. 106234, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106234>

NATHMAN, R., MCNEIL, S., & VAN DAM, T. J. Integrating Environmental Perspectives into Pavement Management: Adding the Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects to the Decision - Making. **Transportation Research Record**, v. 2093, p. 40-49, 2009. <https://doi.org/10.3141/2093-05>

NEWBURN, D.A.; ALBERINI, A. Household Response to Environmental Incentives for Rain Garden Adoption. **Water Resources Research**, v. 52, p. 1345–1357, 2016. <https://doi.org/10.1002/2015WR018063>

NGOHPOK, C; SATA, V.; SATIENNAM, T.; KLUNGBOONKRON, P.; CHINDAPRASIRT, P. Mechanical properties, thermal conductivity, and sound absorption of pervious concrete containing recycled concrete and bottom ash aggregates. **KSCE Journal Civil Eng**, v. 22, p. 1369–76, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0144-6>

NGUYEN, D.H., *et al.* A modified method for the design of pervious concrete mix. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 271–282, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088>

OBLA, K. **Permeable Concrete: An Overview**. Indian Concrete Journal. v. 84, p. 9-18, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267793052_Pervious_concrete_-_An_overview. Acesso em: 06 de mar. 2025.

OLIVEIRA, L. C. B. **Análise da permeabilidade e da colmatção em concretos permeáveis produzidos com agregados reciclados de concreto**. 2017. 108 f. Dissertação (mestrado). Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de ciências exatas, ambientais e tecnologias. Pós-Graduação em sistemas de infraestrutura urbana. Disponível em: https://repositorio.sis.puc-campinas.edu.br/bitstream/handle/123456789/15115/ceatec_ppgsiu_me_Lilian_CBO.pdf. Acesso em: 10 abr. 2025.

PRATICÓ, F. G.; GIUNTA, M.; MISTRETTA, M.; GULOTTA, T. M. Energy and Environmental Life Cycle Assessment of Sustainable Pavement Materials and Technologies for Urban Roads. **Sustainability**, v. 12, p. 704, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12020704>

PALANKAR, N.; SHANKAR, A. R.; MITHUN, B. M. Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 437-448, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.033>

PATIL, J. U.; SNEHAL, P.; PARAG, C. A Review on Study of Properties of Pervious Concrete Mixed with The Plastic (Pet) Fibre. **International Organization of Research & Development (IORD)**, v. 10, 2022. <https://iord.in/index.php/iord/article/view/70>

PAK, G.; PARK, H.; CHO, Y.; KIM, S. The Removal of Nutrients and Heavy Metals Using Household Rain garden. **Journal of Wetlands Research**, v. 17, p. 38 – 44, 2015. <https://doi.org/10.17663/JWR.2015.17.1.038>

PLATI, C.; TSAKOUMAKI, M. Life Cycle Assessment (LCA) of Alternative Pavement Rehabilitation Solutions: A Case Study. **Sustainability**, v. 15, p. 2129, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15032129>

PIMENTEL, H. W., SILVA, I., CHAVES, A.R., FEITOSA, L. Relationship between the performance of pervious concrete slabs with steel slag and the shape properties of coarse aggregates. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 17, n. 5, 2023. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952024000500001>

PILS, S.; OLIVEIRA, P.; F. REGOSO.; PAULON.V. A; COSTELLA, M. F. Pervious concrete: study of dosage and polypropylene fibers addiction. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 1, p. 101–121, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000100009>.

PINHEIRO, I. **Inova civil: descubra tudo sobre asfalto permeável**. Disponível em: <https://www.inovacivil.com.br/asfalto-permeavel/>. Acesso em: 03 mar. 2025

POLISSENI, A. E. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

POLASTRE, B.; SANTOS, L. D. **Concreto Permeável**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo-USP. São Paulo: 2º Semestre de 2006. Disponível em: <http://www.usp.br/>. Acesso em: 09 abr. 2025.

POMPONI, F., & MONCASTER, A. Circular economy for the built environment: A research framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 710-718, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055>

PUTMAN, B. J.; MARTIN, W.D. Comparison of methods for measuring porosity of porous paving mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 299-305, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.038>

RIOS, J.D.; ARENAS, C.; CIFUENTES, H.; PECENO, B.; LEIVA, C. Porous structure by x-ray computed tomography and sound absorption in pervious concretes with air cooled

blast furnace slag as coarse aggregate. **Acoust Aust**, v. 47, p. 271 – 276, 2019.
<http://dx.doi.org/10.1007/s40857-019-00162-5>

RUBIO, M. D. C.; MORENO, F.; MARTÍNEZ-ECHEVARRÍA, M. J.; MARTÍNEZ, G.; VÁZQUEZ, J. M. Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt, **Journal of Cleaner Production**, v. 41, p. 1-6, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.036>.

SAEEDZADEH, R.; ROMANOSCHI, S.A; AKBARIYEH, N.; KHAJEH-HOSSEINI, M.; ABDULLAH, A.Q. Sustainability Assessment of Recycled Asphalt Mixtures Based on Performance in Full-Scale Testing. **Journal of Transportation Engineering. Part B: Pavements**, v. 144, 2018.

SKAF, M.; MANSO, JM; ARAGÓN, A.; FUENTE-ALONSO, JÁ; ORTEGA-LÓPEZ, V. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. **Resources, Conservation and Recycling**, v.120, p. 176-185, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>

SANTOS, J.; THYAGARAJAN, S.; KEIJZER, E.; FLORES, R.; FLINTSCH, G. Pavement life cycle assessment: A comparison of American and european tools. **In Proceedings of the Pavement Life Cycle Assessment Symposium Champaign**, pp. 1–10, 2017.

SAMIR, I. A.; AMR, S. E.; MOSTAFA, S. B. Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 249-256, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.012>

SANDOVAL *et al.* Pervious concrete made with electric furnace slag (FEA): mechanical and hydraulic Properties. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v.12, n. 3, p. 590 – 607. June 2019. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000300009>

SCHAEFER, V.R.; WANG, K.; SULEIMAN, M.T.; KEVERN, J. Mix design development for pervious concrete in cold climates. **Technical Report, National Concrete Pavement Technology Center**, Iowa State Univ., Ames, Iowa, 2006.
<http://dx.doi.org/10.1520/JAI101320>

SHEPARD, T.; LEDERLE, R.; DE LA VEGA, M. V. Comparison of methods for measuring infiltration rate of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 244, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118339>

SHEN, W.; LIU, Y.; WU, M.; ZHANG, D.; DU, X.; ZHAO, D.; XIONG, X. Ecological carbonated steel slag pervious concrete prepared as a key material of sponge city. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120244, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120244>

SHEN, W.; SHAN, L.; ZHANG, T.; MA, H.; CAI, Z.; SHI, H. Investigation on polymer–rubber aggregate modified porous concrete. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 667-674, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.006>

SCHLEGEL, T.; PUIATTI, D.; RITTER, H.-J.; LESUEUR, D.; DENAYER, C.; SHTIZA, A. The limits of partial life cycle assessment studies in road construction practices: A case study on the use of hydrated lime in Hot Mix Asphalt. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 48, p. 141–160, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.005>

SCHWETZ, P.; LORENZI, A.; FERREIRA, L.; LINHARES, V.; PARISOTO, M.; SILVA FILHO, L. Otimização do traço do concreto permeável. **56º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2014.

STRIEDER, H.; V. DUTRA.; A. GRAEFF.; W. NÚÑEZ.; F. MERTEN. Performance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 315, p. 125384, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125384>

SHI, C. Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 3, p. 230-236, 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:3\(230\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(230))

SCHOLZ, M.; GRABOWIECKI, P. Review of permeable pavement systems. **Building and Environment**, v. 42, p. 3830-3836, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016>

GESOĞLU, M.; GÜNEYISI, E.; KHOSHNAW, G; İPEK, S. Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. **Construction and Building Materials**, v. 63, p. 206 – 213, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.046>

NATHMAN, R., MCNEIL, S., & VAN DAM, T. J. Integrating Environmental Perspectives into Pavement Management: Adding the Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects to the Decision - Making. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2093, p. 40-49, 2009. <https://doi.org/10.3141/2093-05>

NAIDU, T. S.; SHERIDAN, C. M.; VAN DYK, L. D. Basic oxygen furnace slag: review of current and potential uses. **Minerals Engineering**, v. 149, p. 106234, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106234>

NGOHPOK, C; SATA, V.; SATIENAM, T.; KLUNGBOONKRONG, P.; CHINDAPRASIRT, P. Mechanical properties, thermal conductivity, and sound absorption

of pervious concrete containing recycled concrete and bottom ash aggregates. **KSCE Journal Civil Eng**, v. 22, p. 1369–76, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0144-6>

PALANKAR, N.; SHANKAR, A. R.; MITHUN, B. M. Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 437–448, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.033>

PIMENTEL, H. W.; CARVALHO, I. C.; SILVA, W. B. C.; CHAVES, A.R.; BABADOPULOS, L. F. A. Relationship between the performance of pervious concrete slabs with steel slag and the shape properties of coarse aggregates. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 17, n. 5, 2023. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952024000500001>

PILS, S.; OLIVEIRA, P.; F. REGOSO.; PAULON, V. A; COSTELLA, M. F. Pervious concrete: study of dosage and polypropylene fibers addiction. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 12, n. 1, p. 101–121, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000100009>.

REHAN, T.; QI, Y.; WERNER, A. Life-cycle cost analysis for traditional and permeable pavements. In: **CONSTRUCTION Research Congress 2018: Sustainable Design and Construction and Education- Selected Papers from the Construction Research Congress 2018**. [S.l.]: American Society of Civil Engineers (ASCE), P. 422-431, 2018.

REBITZER, Gerald *et al.* Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, v. 30, n. 5, p. 701-720, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>

SANDOVAL *et al.* Pervious concrete made with electric furnace slag (FEA): mechanical and hydraulic Properties. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v.12, n. 3, p. 590 – 607, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000300009>

SAEEDZADEH, R.; ROMANOSCHI, S.A; AKBARIYEH, N.; KHAJEH-HOSSEINI, M.; ABDULLAH, A.Q. Sustainability Assessment of Recycled Asphalt Mixtures Based on Performance in Full-Scale Testing. **Journal of Transportation Engineering. Part B: Pavements**, v. 144, 2018.

SKAF, M.; MANSO, J.M; ARAGÓN, A.; FUENTE-ALONSO, J.A; ORTEGA-LÓPEZ, V. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. **Resources, Conservation and Recycling**, v.120, p. 176-185, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>

SCHWETZ, P.; LORENZI, A.; FERREIRA, L.; LINHARES, V.; PARISOTO, M.; SILVA FILHO, L. Otimização do traço do concreto permeável. **56º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2014.

SHI, C. Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 3, p. 230-236, 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:3\(230\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(230))

SINGH, A.; VADDY, P.; BILIGIRI, K. P. Quantification of embodied energy and carbon footprint of pervious concrete pavements through a methodical lifecycle assessment framework. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 161, p. 104953, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104953>

SOUZA, C. F; CRUZ, M. A. S; TUCCI, C. E. M. Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v.17, n.2. p. 9-18. 2012.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. The influence of recycled concrete aggregates in pervious concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 1, p. 75–89, fev. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952016000100006>

TAHIRI, I.; DANGLA, P.; VANDAMME, M.; VU, Q.H. Numerical investigation of salt-frost damage of pervious concrete at the scale of a few aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 162, p. 106971, 2022. <https://hal.science/hal-04186670v1>

TENNIS, P.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious Concrete Pavements**. Technical Report, EB30202. Portland Cement Association, Skokie, Illinois and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/242722509_Pervious_Concrete_Pavements. Acesso em: 5 mar. 2025.

TEIXEIRA, B. C. S.; FORTES, R. M. **Estudo da Dosagem de Concreto Poroso Aplicado a Pavimentação (Study of Pervious Concrete Dosage For Use In Pavements)**. In: CONIN FRA – Anais do Congresso De Infraestrutura De Transportes, São Paulo. 2009:

THIAGARAJAN, M.; NEWMAN, G.; ZANDT, S. The Projected Impact of a Neighborhood-Scaled Green-Infrastructure Retrofit. **Sustainability**, v. 10, p. 3665, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10103665>

TORRES-MACHI, C.; NASIR, F.; ACHEBE, J.; SAARI, R.; TIGHE, S.L. Sustainability Evaluation of Pavement Technologies through Multicriteria Decision Techniques. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 25, n. 03, 2019.

TUCCI, C. E. M. **Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 5-12, 1997.

UEPG. **Revisão Anual para 2020–2021**; European Aggregates Association: Bruxelas, Bélgica, 2021.

ULSEN, C. *et al.* Separability studies of construction and demolition waste recycled sand. **Waste Management**, v. 33, n. 3, p. 656-662, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.06.018>

U.S. Environmental Protection Agency. 2009. **Nitrogen and P Loads in Large Rivers**. Disponível em: https://cfpub.epa.gov/roe/indicator_pdf.cfm?i=33. Acesso em: 10 abr.2025.

VAZ, I. C. M. **Análise do Ciclo de Vida de sistemas de captação de água pluvial por telhados e pavimentos permeáveis em edificações universitárias brasileiras**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis. 2022. 241 f. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/247293>. Acesso em: 03 mar. 2025.

VARDAKA, G.; THOMAIDIS, K.; LEPTOKARIDIS, C.; TSIMAS, S. Use of steel slag as coarse aggregate for the production of pervious concrete. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, v. 2, p. 30 - 40, 2014. <http://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.2014.02.0003>

VOLDER, A.; TODD, W.; BHAVANA, V. Potential use of pervious concrete for maintaining existing mature trees during and after urban development. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 8, p. 249-256, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2009.08.006>

WANG, H.-Y.; CHEN, K.-W. A study of the engineering properties of CLSM with a new type of slag. **Construction and Building Materials**, v. 102, part 1, p. 422 - 427, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.198>.

WANG, G.; CHEN, X.; DONG, Q.; YUAN, J; HONG, Q. Mechanical performance study of pervious concrete using steel slag aggregate through laboratory tests and numerical simulation. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, p. 121208, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121208>

WEISS, P. T.; KAYHANIAN, M.; KHAZANOVICH, L.; GULLIVER, J. S. Permeable pavements in cold climates: state of the art and cold climate case studies. **Center for Transportation Studies**. University of Minnesota, Minneapolis. 2015. Disponível em: <https://www.cts.umn.edu/publications/report/permeable-pavements-in-cold-climates-state-of-the-art-and-cold-climate-case-studies>. Acesso em: 07 mar. 2025.

XIANGRUI, M.; Wei, W.; HEHUA, Z.; YAJI, J.; RUI, J.; XINBIN, T. Gas sealing behavior of gasketed segmental joints in shield tunnels: An experimental and computational study, **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 132, p. 104906, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104906>

WU. H.; LIU, Z.; SUN. B.; YIN, J. Experimental investigation on freeze–thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC). **Construction and Building Materials**, v.117, p. 63-71, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.130>

YAVUZ, D. The effect of recycled pervious concrete aggregate substitution on properties of pervious concrete. **Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies**, v. 9, p. 412 - 420, 2024. <https://doi.org/10.47481/jscmt.1607813>

YARRAMSETTY, S.; SIVAKUMAR, M.; RAJ, A. Recent Developments in Life Cycle Assessment and Service Life Prediction: **A Review. In Proceedings of the Conference Challenges of Urbanization in Emerging Economies - ASCE**, pp. 509–520, 2017.

YANG, J.; GUOLIANG, J. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 381-386, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00966-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00966-3)

YEIH, W.; CHANG, J. The influences of the type of cement and the healing condition on the properties of the permeable concrete made with the scum to the electric archery as aggregates. **Construir. Construir. Mater.** v. 197, p. 813 e 820, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.178>

YEIH, W.; FU, T.C.; CHANG, J.J.; WUW, R. Properties of pervious concrete made with air-cooling electric arc furnace slag as aggregates. **Construction and Building Materials**, v.93, p. 737-745, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.104>

YUWADEE, Z.; AMPOL, W.; VANCHAI, S.; PRINYA, C. Use of coal ash as geopolymer binder and coarse aggregate in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 289-295, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.076>

ZHANG, W.; YANG, J.; FAN, X.; YANG, R.; YU, B. Life cycle cost analysis of base course using in-situ cold recycling: case study. **Proceedings of the Geo-Frontiers**, pp. 4428–4437, 2011.

ZHAO, Y.; GOULIAS, D.; PETERSON, D. Recycled Asphalt Pavement Materials in Transport Pavement Infrastructure: Sustainability Analysis & Metrics. **Sustainability**, v.13(14), p. 8071; 2021. <https://doi.org/10.3390/su13148071>

ZAETANG, Y.; WONGSA, A.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. Use of coal ash as geopolymer binder and coarse aggregate in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 289-295, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.076>

ZHOU, Z.; GU, X.; DONG, Q.; NI, F.; JIANG, Y. Rutting and fatigue cracking performance of SBS-RAP blended binders with a rejuvenator. **Construction and Building Materials**. v. 203, p. 294–303, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.119>