

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VITOR GABRIEL GIARETTA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CINZA DA CASCA DE ARROZ, ESCÓRIA DE
ALTO-FORNO E CINZA LEVE NO POTENCIAL DE REDUÇÃO DA EMISSÃO DE
CO₂ DECORRENTE DA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND**

**PATO BRANCO
2025**

VITOR GABRIEL GIARETTA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CINZA DA CASCA DE ARROZ, ESCÓRIA DE ALTO-FORNO E CINZA LEVE NO POTENCIAL DE REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ DECORRENTE DA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

Study on the influence of rice husk ash, blast furnace slag, and fly ash on the potential for reducing CO₂ emissions from Portland cement production

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Profa. Dra. Caroline Angulski da Luz.
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Cezar Vitorio Junior.

PATO BRANCO

2025



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

VITOR GABRIEL GIARETTA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CINZA DA CASCA DE ARROZ, ESCÓRIA DE ALTO-FORNO E CINZA LEVE NO POTENCIAL DE REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ DECORRENTE DA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 25/junho/2025

Caroline Angulski da Luz

Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

Paulo Cezar Vitorio Junior

Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade de Passo Fundo
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

José Ilo Pereira Filho

Doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

Priscila Ongaratto Trentin

Doutorado em Engenharia Civil (PPGEC) pela Universidade Federal do Paraná
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

PATO BRANCO

2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha família pelo apoio incondicional durante toda a trajetória na Universidade e também na vida.

Em sequência, a minha orientadora Professora Dra. Caroline Angulski da Luz e meus Coorientadores, Professor Dr. Paulo Cezar Vitorio Junior e Cleiton José Brum, pela sabedoria compartilhada e pela paciência com que me guiaram ao longo deste processo.

RESUMO

O concreto é o material artificial mais consumido do mundo. O cimento é o principal constituinte do concreto, este, é um dos principais responsáveis pela emissão de dióxido de carbono na construção civil. Este trabalho objetiva avaliar o potencial de aquecimento global em substituição parcial do cimento Portland por cinza de casca de arroz, escória de alto forno e cinza leve e analisar a influência das substituições em diferentes teores nas propriedades mecânicas de tração e compressão em argamassas. A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) foi conduzida utilizando a ferramenta SimaPro, usando base de dados da Ecolnvent 3.11 e Agri-footprint, por meio do método ReCiPe 2016 Midpoint Hierarchist com fronteiras do berço ao portão excluindo o transporte e com unidade funcional de 1kg. Os resultados apresentaram, a escória de alto forno como o material com menor impacto ambiental, apesar das perdas de resistência mais elevadas, com redução de até 64% na emissão de CO₂-eq. A cinza de casca de arroz proporcionou melhor equilíbrio entre o desempenho mecânico e impacto ambiental, especialmente no teor de 30%, com aumento de resistência à compressão de 40% em relação à referência e redução da emissão de kgCO₂-eq em 15%. A cinza volante proporcionou ao cimento boas resistências mecânicas, mas elevado impacto ambiental atrelado à demanda energética na sua produção. As adições estudadas conferiram maiores resistências mecânicas, com exceção da escória de alto forno em alguns casos, e redução das emissões de CO₂, além de promoverem a redução do descarte inadequado desses materiais e a demanda por clínquer de cimento Portland.

Palavras-chave: Avaliação de ciclo de vida; cimento Portland; escória de alto forno; cinza volante; cinza de casca de arroz.

ABSTRACT

Concrete is the most consumed artificial material in the world. Cement is the main constituent of concrete, which is one of the main causes of carbon dioxide emissions in civil construction. This study aims to evaluate the global warming potential of partially replacing Portland cement with rice husk ash, blast furnace slag and fly ash, and to analyze the influence of replacements in different levels on the mechanical properties of tension and compression in mortars. The Life Cycle Assessment (LCA) was conducted using the SimaPro tool, using the EcoInvent 3.11 and Agri-footprint databases, using the ReCiPe 2016 Midpoint Hierarchist method with cradle-to-gate boundaries excluding transportation and with a functional unit of 1 kg. The results showed that blast furnace slag was the material with the lowest environmental impact, despite the highest strength losses, with a reduction of up to 64% in CO₂-eq emissions. Rice husk ash provided a better balance between mechanical performance and environmental impact, especially at 30% content, with a 40% increase in compressive strength compared to the reference and a 15% reduction in kgCO₂-eq emissions. Fly ash provided the cement with good mechanical strength, but a high environmental impact linked to the energy demand in its production. The additions studied provided greater mechanical strength, with the exception of blast furnace slag in some cases, and reduced CO₂ emissions, in addition to promoting a reduction in the improper disposal of these materials and the demand for Portland cement clinker.

Keywords: Life cycle assessment; Portland cement; blast furnace slag; fly ash; rice husk ash.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema do processo produtivo do cimento.....	18
Figura 2 - Estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida.....	24
Figura 3 - Esquema geral de funcionamento da Avaliação do Ciclo de Vida	25
Figura 4 - Fluxograma dos processos metodológicos	28
Figura 5 - Difratrograma Escória de Alto Forno	30
Figura 6 - Pozolanidade aos 8 dias Cinza de Casca de Arroz	32
Figura 7 - Fases mineralógicas Cinza de Casca de Arroz	33
Figura 8 - Quantificação das fases mineralógicas Cinza de Casca de Arroz.....	33
Figura 9 - Pozolanidade aos 8 dias Cinza Volante	35
Figura 10 - Fases mineralógicas Cinza Volante.....	35
Figura 11 - Quantificação das Fases Mineralógicas Cinza Volante	36
Figura 12 - Ensaio de consistência das misturas.....	38
Figura 13 - Desempenho Mecânico das Argamassas com CCA, CV e EAF	43
Figura 14 - Emissão de dióxido de carbono (kg CO ₂ -eq) por tipo de adição.....	47
Figura 15 - CO ₂ -eq por unidade de Resistência (MPa) na tração	48
Figura 16 - CO ₂ -eq por unidade de Resistência (MPa) na compressão.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química CPV - ARI	28
Tabela 2 – Composição e consistência das misturas	36
Tabela 3 – Materiais e Processos do SimaPro.....	41
Tabela 4 – Variação Percentual das Resistências em relação ao Referência	44
Tabela 5 – Impactos Ambientais do SimaPro por Categoria e Tipo de Adição .	45
Tabela 6 – Comparação entre 1 kWh da CV e CP V ARI	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Requisitos químicos do cimento Portland	19
Quadro 2 - Requisitos Físicos e mecânicos de acordo com a NBR 16697	20
Quadro 3 - Limites de composição do cimento Portland (% de massa)	21
Quadro 4 - Composições químicas Escória de Alto Forno	29
Quadro 5 - Propriedades químicas Escória de Alto Forno	30
Quadro 6 - Propriedades químicas Cinza de Casca de Arroz	31
Quadro 7 - Exigências químicas das pozolanas Cinza de Casca de Arroz	31
Quadro 8 - Composição química Cinza de Casca de Arroz.....	31
Quadro 9 - Composição química Cinza Volante	34
Quadro 10 - Propriedades químicas Cinza Volante.....	34
Quadro 11 - Exigências químicas Cinza Volante.....	34
Quadro 12 - Índice de consistência	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos:	14
1.2	Justificativa.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	Processo de fabricação do cimento	17
2.2	Uso de adições na fabricação do cimento	18
2.3	Influência das adições nas propriedades mecânicas	20
2.4	Sustentabilidade na construção civil	22
2.5	Avaliação do Ciclo de Vida.....	23
3	METODOLOGIA	27
3.1	Caracterização dos Materiais	28
3.1.1	Cimento Portland.....	28
3.1.2	Adições.....	29
3.1.3	Escória de alto forno.....	29
3.1.4	Cinza de casca de arroz.....	30
3.1.5	Cinza volante.....	33
3.1.6	Agregado miúdo	36
3.2	Métodos.....	36
3.2.1	Definição das Misturas	36
3.2.2	Preparo das argamassas	37
3.3	Ensaios de Propriedades Mecânicas.....	38
3.4	Avaliação Ambiental	39
3.4.1	Definição de objetivo e escopo.....	39
3.4.2	Análise de inventário de ciclo de vida.....	40
3.4.3	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida	41
3.4.4	Interpretação	42
4	RESULTADOS E ANÁLISES	43
4.1	Ensaios de tração na flexão e compressão	43

4.2	Análise de impactos ambientais	45
4.2.1	Análise das alternativas com menores emissões de CO ₂ -eq	45
4.2.2	Avaliação Ambiental: CO ₂ -eq por Unidade de Resistência (MPa)	47
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERÊNCIAS.....	52
	APÊNDICE A	57
	APÊNDICE B	58

1 INTRODUÇÃO

A origem do cimento remonta a cerca de 2500 anos a.C., com a utilização de uma mistura de gesso calcinado pelos egípcios em seus monumentos. O cimento passou a ser reconhecido somente no século XVIII, com as descobertas por meio da calcinação de calcários moles e argilosos por John Smeaton, sendo somente em 1824 que o cimento Portland como conhecemos surgiu, patenteado por Joseph Aspdin (Battagin, 2024). Atualmente, o cimento é um material essencial na indústria da construção, entretanto, sua produção é atrelada a intensas emissões de CO₂, contribuindo com cerca de 7% das emissões globais de gases de efeito estufa (Visedo; Pecchio, 2019).

O clínquer é o principal componente do cimento, este é produzido através da calcinação do calcário o que libera grandes quantidades de dióxido de carbono. Estima-se que, para cada 1000 kg de calcário calcinado são gerados cerca de 700 kg de CO₂ (Nie et al., 2022). Diante disso, a indústria do cimento busca alternativas para mitigar suas emissões, sendo uma das principais estratégias a substituição parcial do clínquer por adições. De acordo com Visedo e Pecchio (2019) a redução da razão clínquer/cimento de 67% em 2014 para 52% em 2050 poderá evitar a emissão de 290 Mt de CO₂.

Muitos materiais têm sido pesquisados para substituir o cimento, como escórias siderúrgicas, cinzas volantes, pozolanas artificiais e filler calcário. Estes, não só reduzem as emissões de CO₂, mas também apresentam ganhos nas propriedades mecânicas do concreto, como resistência e durabilidade. Entre as adições mais promissoras estão a escória de alto-forno, obtida na produção de ferro-gusa (Pal; Mukherjee; Pathak, 2003), e os materiais pozolânicos, como cinzas leves e cinzas de casca de arroz, que apresentam propriedades que, ao interagirem com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento Portland, confere maior redução de vazios a matriz cimentícia, este processo é conhecido como reação pozolânica, que confere resistência através da formulação de compostos secundários de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que aumentam a densidade da matriz do concreto (Souza et al., 2015).

A sustentabilidade firmou-se como uma prioridade global por meio da criação do Protocolo de Kyoto criado em 1997 e posteriormente o Acordo de Paris de 2015,

estes, buscam limitar o aumento da temperatura global a menos de 2°C. Nesse contexto, a construção civil, um dos setores mais emissores de CO₂ busca soluções para diminuir seu impacto ambiental, sendo as adições uma alternativa viável para atingir as metas de preservação ambiental. A indústria cimenteira brasileira desenvolveu o 'Roadmap Brasil', que propõe a redução de sua intensidade carbônica em 33% até 2050, com a intensificação do uso de adições como uma das principais medidas (SNIC, 2019).

Portanto, a substituição parcial do cimento por adições, como escória de alto-forno, cinza de casca de arroz e cinzas leves, contribui não só para a redução das emissões de CO₂, mas também promove a sustentabilidade no setor da construção. Somado a essa, o uso de adições provenientes de resíduos industriais como aglomerante oferece uma solução eficaz para o descarte de materiais e contribui para a economia circular, com benefício para o meio ambiente e para as propriedades mecânicas dos meus compostos cimentícios. Dessa forma, o trabalho visa comparar a viabilidade da substituição do cimento por cinza de casca de arroz, a cinza leve e a escória de alto forno, em termos de propriedades mecânicas em argamassas e emissão de gases do efeito estufa.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

- Avaliação das adições na resistência mecânica e no potencial de redução da emissão de CO₂ da matriz cimentícia composta por cinza de casca de arroz, escória de alto forno e cinza leve.

1.1.2 Objetivos Específicos:

- Avaliar a influência dos teores de cinza da casca de arroz, escória de alto-forno e cinza leve na resistência à compressão e à tração de argamassa.
- Quantificar o potencial de redução de dióxido de carbono em argamassas com diferentes adições por meio da Avaliação de Ciclo de Vida.

1.2 Justificativa

A Global Cement and Concrete Association (2024), afirma que o concreto é o segundo material mais consumido no mundo, perdendo somente para a água, com uma demanda global anual de cerca de 14 bilhões de metros cúbicos. A indústria do cimento responde por 8% das emissões globais de dióxido de carbono, este, o principal componente do concreto, contribui assiduamente para o aquecimento global (Sivakrishna et al., 2020). No Brasil, a produção de cimento alcançou 67 milhões de toneladas (SNIC, 2019), demonstrando a alta demanda e o impacto ambiental desse setor. Nessa ótica, a utilização de adições minerais como escória de alto-forno, cinza de casca de arroz e cinza leve em substituição parcial do cimento, mostra-se como uma estratégia que tem ganhado espaço quando trata-se de promover a diminuição do impacto ambiental gerado pela construção civil.

A escória de alto-forno, resíduo proveniente de fornos à base de carvão mineral derivado da produção de ferro-gusa, é amplamente utilizada como adição ao cimento devido às suas propriedades técnicas e ambientais. Segundo Farias M, Farias C e Picanço (2023) a substituição parcial do cimento por escória resfriada instantaneamente melhora a resistência à compressão do concreto. Somado a esta, a utilização da escória contribui para a redução da porosidade capilar e para o aumento da durabilidade do concreto, aumentando sua capacidade de resistência a ataques químicos e minimizando os efeitos da reação álcali-silica, características que reiteram seu potencial de elevada eficiência técnica e ambiental (Keles, 2011).

A cinza de casca de arroz (CCA), é um subproduto da queima controlada da casca de arroz em processos de geração de energia. Durante o processo de hidratação do cimento Portland, a CCA em contato com o hidróxido de cálcio reage formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que aumentam a resistência mecânica através da redução da porosidade, por consequência, há aumento da durabilidade do concreto. Também, outro fator que consolida seu papel como adição sustentável é a diminuição do descarte inadequado da cinza, conferindo a ela, alto valor agregado (Hoffmann; Sartori, 2010).

Já cinza volante é um resíduo proveniente da combustão do carvão pulverizado, apresentando propriedades pozolânicas. A combustão do carvão mineral

em usinas térmicas, geram três resíduos sólidos: escória, cinza pesada e a cinza leve (volante). As cinzas leves são coletadas nos precipitadores eletrostáticos, estas são constituídas por partículas de dimensões inferiores a 0,15 mm que são arrastadas pelos gases na combustão (Rohde; Chies; Da Silva, 2006). Para as empresas geradoras, esse resíduo torna-se um problema em relação à destinação final, além de produzir um grande volume de resíduos, a destinação desse material torna-se onerosa no processo produtivo (Almeida; Gomes, 2021).

Nesse sentido, as adições minerais como escória de alto-forno, cinza de casca de arroz e cinza volante demonstra-se valiosas a medida que apresentam o potencial de reduzir as emissões de CO₂ e promovem a reutilização de resíduos industriais e agrícolas. A presente pesquisa busca compreender como as adições minerais em substituição parcial do cimento Portland influenciam as propriedades mecânicas de argamassas e contribuem para a redução das emissões de CO₂.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Processo de fabricação do cimento

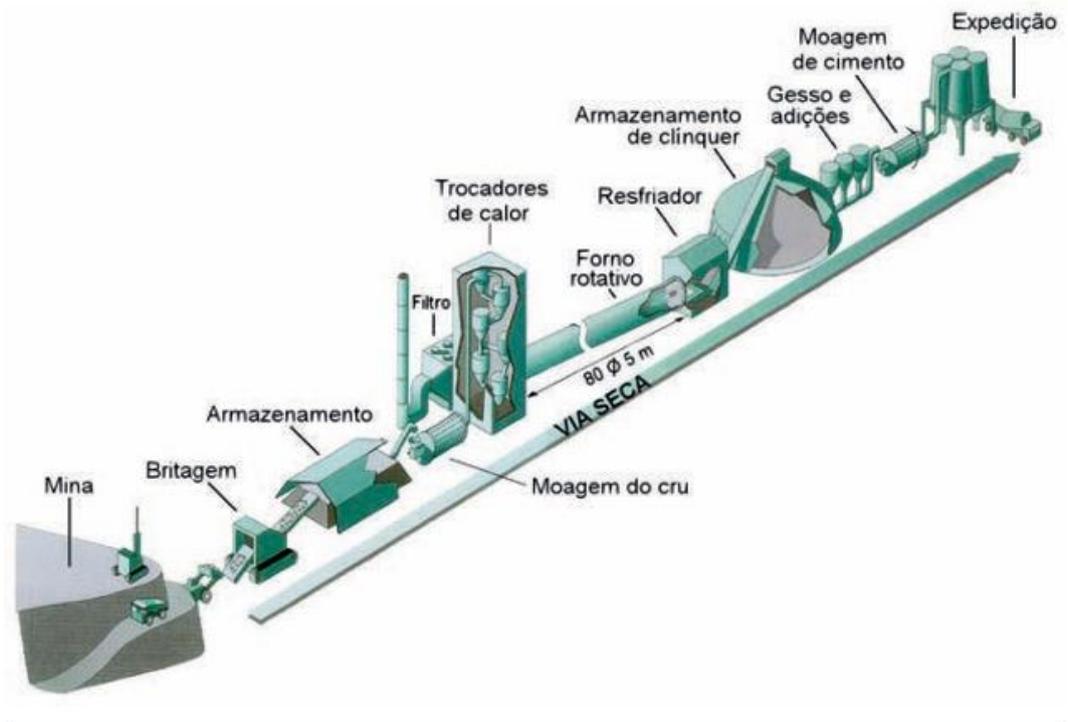
O cimento Portland é produzido a partir da combinação de materiais calcários e argilosos, submetidos a processos químicos e físicos que transformam esses elementos em clínquer, o principal componente do cimento. As etapas fundamentais incluem a extração e preparação das matérias-primas, a formação do clínquer em altas temperaturas e, finalmente, a moagem e adição de outros componentes para obtenção do produto final (CNI; ABCP, 2017).

A fabricação do clínquer depende da umidade da matéria-prima, pode-se realizar o processo pela via seca, semi-seca, semiúmida ou úmida. Entre essas, a via mais eficiente e com menor impacto ambiental é a via seca, sendo amplamente adotada em instalações modernas. Neste processo, utiliza-se calcário misturado em proporção de 75 a 80% e argila na faixa de 20% a 25%, também outras substâncias, como minério de ferro, areia e bauxita que são adicionadas para corrigir a composição química da mistura (CNI; ABCP, 2017).

Após a extração, o calcário é triturado e homogeneizado com os outros componentes, formando a um material fino que passa por etapas de aquecimento e calcinação em fornos rotativos, onde temperaturas de até 1.450°C transformam os materiais em clínquer (TAYLOR, 1998).

No processo de aquecimento, diferentes reações acontecem e resultando em fases que determinam as propriedades mecânicas da matriz cimentícia, como a alita, que confere ganho de resistência inicial, belita e o aluminato tricálcico e ferrita tetracálcica (TAYLOR, 1998). Assim, quando o clínquer é moído juntamente outras adições como o gesso e materiais pozolânicos é possível ajustar as características do produto, como resistência mecânica, tempo de pega e durabilidade (CNI; ABCP, 2017).

Figura 1 - Esquema do processo produtivo do cimento



Fonte: Confederação Nacional da Indústria, 2017

2.2 Uso de adições na fabricação do cimento

As adições são materiais complementares ao clínquer, que quando incorporados na fase de moagem do clínquer conferem diferentes características à matriz cimentícia. A exemplo dessas adições, tem-se o gesso, utilizado para controlar o tempo de pega, as escórias granuladas de alto-forno, os materiais pozolânicos e os carbonáticos, estes materiais passaram a ser comumente empregados devido às propriedades que melhoram e modelam o uso do cimento para casos especiais (ABCP, 2002).

Dentre os tipos de Cimento Portland possíveis, existem diversas variantes com adições significativas: o CP II-E (escória de alto-forno), CP II-Z (materiais pozolânicos) e CP II-F (filer calcário). O diferencial desses cimentos é a utilização de materiais diversos como substituição parcial do cimento, equilibrando desempenho técnico e sustentabilidade, reduzindo a emissão de CO₂ durante a fabricação ao diminuir a proporção de clínquer na composição e conferir propriedades pozolânicas e ganhos maiores de resistências em idades mais avançadas (NEVILLE, 2011).

A atratividade das adições não se restringe apenas a caráter ambiental, em relação a desempenho mecânico, o CP III, com teores de escória de 35% a 70%, oferece alta durabilidade e resistência química, sendo ideal para obras de infraestrutura em ambientes agressivos, como estruturas marítimas e fundações de usinas. Somado a este, o CP IV, que pode conter até 50% de pozolanas, destaca-se em aplicações como barragens e estações de tratamento de esgoto, por conta da conferência de maior resistência à ataques químicos e agentes agressivos (ABCP, 2002; NEVILLE, 2011).

Os requisitos químicos dos cimentos com adições, seguem a normatização da NBR 16697/2018 (ABNT, 2018c) que determina as seguintes porcentagens de acordo com o quadro 1.

Quadro 1 - Requisitos químicos do cimento Portland

Sigla ^a	Resíduo insolúvel (RI)	Perda ao fogo (PF)	Óxido de magnésio (MgO)	Trióxido de enxofre (SO ₃)
CP I	≤ 5,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP I -S	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP II-E	≤ 5,0	≤ 8,5	-	≤ 4,5
CP II-F	≤ 7,5	≤ 12,5	-	≤ 4,5
CP II-Z	≤ 18,5	≤ 8,5	-	≤ 4,5
CP III	≤ 5,0	≤ 6,5	-	≤ 4,5
CP IV	-	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP V ^b	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Estrutural	≤ 3,5	≤ 12,0	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Não estrutural	≤ 7,0	≤ 27,0	≤ 10,0	≤ 4,5

^a Requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes a sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.

^b No caso de cimentos resistentes a sulfatos derivados do cimento tipo CPV, não há limitação para RI e MgO

Fonte: (ABNT, 2018a)

Para a escória ser utilizada deve atender a composição química regida pela equação 1.

$$\frac{CaO+MgO+Al_2O_3}{SiO_2} > 1 \quad (1)$$

Já para materiais pozolânicos, a NBR 5752 (ABNT, 2014b) determina pelo menos 75% de reatividade aos 28 dias, a norma define apenas valores-limites para o SO₃.

Quadro 2 - Requisitos Físicos e mecânicos de acordo com a NBR 16697

Sigla	Classe	Finura	Tempo de início de pega min	Expansibilidade a quente mm	Resistência à compressão MPa				Índice de brancura -
		Resíduo na peneira 75 μm %			1 dias	3 dias	7 dias	28 dias	
CP I CP I-S CP II-E CP II-F CP II -Z	25	$\leq 12,0$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 8,0$	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	-
	32	$\leq 12,0$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$	-
	40	$\leq 10,0$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	$\geq 40,0$	-
CP III CP IV	25	$\leq 8,0$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 8,0$	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	-
	32	$\leq 8,0$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$	-
	40	$\leq 8,0$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 12,0$	$\geq 23,0$	$\geq 40,0$	-
CP V	ARI	$\leq 8,0$	≥ 60	≤ 5	$\geq 14,0$	$\geq 24,0$	$\geq 34,0$	-	-
CPB estrutural	25	$\leq 12^b$	≥ 60	≤ 5		$\geq 8,0$	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	$\geq 78,0$
	32	$\leq 12^b$	≥ 60	≤ 5		$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$	
	40	$\leq 12^b$	≥ 60	≤ 5		$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	$\geq 40,0$	
CPB não estrutural	-	$\leq 12,0^b$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 5,0$	$\geq 7,0$	$\geq 10,0$	$\geq 82,0$

^a requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes a sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida de sufixo RS ou BC, respectivamente.

^b Resíduo na peneira 45 μm

Fonte: (ABNT, 2014a)

2.3 Influência das adições nas propriedades mecânicas

Reconhecida como uma das mais importantes propriedades do concreto no estado endurecido, a resistência a compressão é um dos motivos do sucesso dos materiais cimentícios (MASSUCATO, 2005). No Brasil, os métodos de avaliação dessa característica estão descritos nas normas NBR 5739 (ABNT, 2018), que especifica os ensaios de compressão, e NBR 5738 (ABNT, 2015a), que regulamenta a moldagem e cura dos corpos de prova.

Adições minerais, como cinza volante, cinza de casca de arroz e escória de alto-forno, têm sido amplamente utilizadas para melhorar as propriedades mecânicas do concreto, em especial a resistência à compressão, por meio de alterações na microestrutura que aumentam a densidade da matriz por meio da formação de

produtos hidratados, como o gel C-S-H, pela atividade pozolânica ou pela reatividade da escória (ABCP, 2002).

A escória de alto-forno, demonstra propriedades similares ao clínquer quando entra em contato com a água. Sua adição ao concreto proporciona vantagens como redução da reação álcali-agregado, menor calor de hidratação, maior resistência a sulfatos e aumento da resistência à compressão em idades avançadas (MASSUCATO, 2005). Normativas específicas limitam o teor de adições nos cimentos, buscando equilíbrio entre a eficiência dessa adição, conforme o quadro 3 (ABCP, 2002).

Já os materiais pozolânicos apresentam propriedades aglomerantes quando em contato com a água e o hidróxido de cálcio liberado pelas reações químicas da hidratação do clínquer. Essas adições reduzem a porosidade do concreto, aumentando sua resistência e durabilidade. As pozolanas são frequentemente mais baratas que o cimento Portland que substituem, mas a maior vantagem é o ganho de resistência em idades avançadas e a boa resistência a sulfatos (NEVILLE, 2011; Sabir; Wild; Bai, 2001).

Quadro 3 - Limites de composição do cimento Portland (% de massa)

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clinquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material Carbonático
Cimento Portland comum	CP I	25,32 ou 40	RS ou BC	95 - 100	0 - 5		
	CP I-S			90 - 94	0	0	6 - 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E			51 - 94	6 - 34	0	0 - 15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z			71 - 94	0	6 - 14	0 - 15
Cimento Portland com material carbonático	CP II-F			75 - 89	0	0	11 - 25
Cimento Portland de alto forno	CP III			25 - 65	35 - 75	0	0 - 10
Cimento Portland pozolânico	CP IV			45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V ^a			ARI		90 - 100	0
Cimento Portland Branco	CPB	25, 32 ou 40		75 - 100	-	-	0 - 25
	Não estrutural	-	-	50 - 74	-	-	26 - 50

^a No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS). Podem ser adicionados escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos

Fonte: (ABNT, 2018a)

2.4 Sustentabilidade na construção civil

A palavra “sustentável” origina-se do latim *sustinere*, que significa aguentar, apoiar e suportar. Termo esse que deriva de *citare*, que pode ser traduzido como encorajar ou promover. Dessa forma, sustentabilidade engloba dois pilares amplamente discutidos no contexto ecológico: apoiar e promover (SILVA, 2012).

O Relatório de Brundtland de 1987 introduziu o conceito de desenvolvimento sustentável, este, elaborado pela Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento da Organização das Nações Unidas (ONU), determinou desenvolvimento sustentável como “um processo que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades” (SILVA, 2012). Este marco inicial proporcionou uma base para discussões globais sobre equilíbrio ambiental, econômico e social.

Mas foi em 1997, durante a 3ª Conferência das Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas, que outro grande estímulo do desenvolvimento social foi criado: o Protocolo de Kyoto. Este, onde os países-membros da Convenção possuíam como uma das principais metas a redução de emissões de gases do efeito estufa em pelo menos 5,2% abaixo dos níveis de 1990, nos anos entre 2008 e 2012. Posteriormente, a porcentagem aumentou para 18% abaixo dos níveis de 1990 e prolongado as datas para o período de 2013 a 2020. Foi com a criação deste protocolo que surgiu a possibilidade de compra e venda de créditos de carbono. Os créditos de carbono são obtidos por países que possuem baixa emissão de CO₂ que fecham negócio com os países poluidores. Contudo, no ano de 2015, o Protocolo de Kyoto foi substituído pelo Acordo de Paris, que entrou em vigor em 2016, que tem como meta manter o aumento da temperatura do planeta menor do que 2°C (AGUIERRI, 2025).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), traz a pauta sobre a interdependência entre sistemas naturais, sociais e econômicos que enfatiza a necessidade de enfrentar as mudanças climáticas, considerando o apoio ao bem-estar humano e a promoção da preservação ambiental (IPCC, 2022).

Em 2023, o IPCC estimou que as atividades humanas contribuíram para um aquecimento global de aproximadamente 1,0°C acima dos níveis pré-industriais, com uma margem provável entre 0,8°C e 1,2°C. Projeta-se que o aquecimento global alcance 1,5°C entre 2030 e 2052, caso a tendência atual de aumento persista (CALVIN et al., 2023).

A intensa exploração de recursos naturais torna o setor da construção civil, ao longo do seu ciclo de vida, responsável por 38% das emissões globais de CO₂ (UNEP, 2020). Estas, decorrem principalmente do processo de fabricação do cimento, um material essencial, mas altamente poluente. O CaCO₃ é calcinado e como resultado produz cal (CaO) e como sub-produto o CO₂. Depois de produzida, a cal (CaO) reage com a sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e o óxido de ferro (Fe₂O₃) formando o clínquer, um produto intermediário, que é moído com uma porção de gesso para fabricação do cimento Portland (SNIC; ABCP, 2010).

A fabricação do cimento exige de 12-15% de toda a energia globalmente consumida pelas indústrias, tornando-se o terceiro maior processo com maior intensidade de gasto energético de todas as atividades industriais. Nomeadamente, 90% destas emissões são diretas CO₂, 50% atribuídas à decomposição endotérmica do calcário (principalmente CaCO₃) e 40% do consumo de combustível. Os 10% restantes são emissões indiretas derivadas da demanda de energia elétrica (TERÁN-CUADRADO et al., 2024).

É na etapa de calcinação, queima e produção de combustíveis fósseis que os valores mais significativos de emissões do ciclo de vida do clínquer acontecem. Assim, a incorporação de adições minerais, como pozolanas e escória de alto-forno, é uma alternativa eficiente para reduzir as emissões associadas ao cimento (Paet al., 2014). Nesse sentido, a relevância das emissões associadas ao cimento demanda ações que promovam maior sustentabilidade no setor (ROOTZÉN; JOHNSON, 2017).

Embora a construção civil seja crucial para o desenvolvimento socioeconômico, faz-se necessário integrar práticas sustentáveis, adotando tecnologias que utilizem materiais que minimizem a geração de impactos negativos e políticas de regulação que assegurem um futuro equilibrado para as próximas gerações.

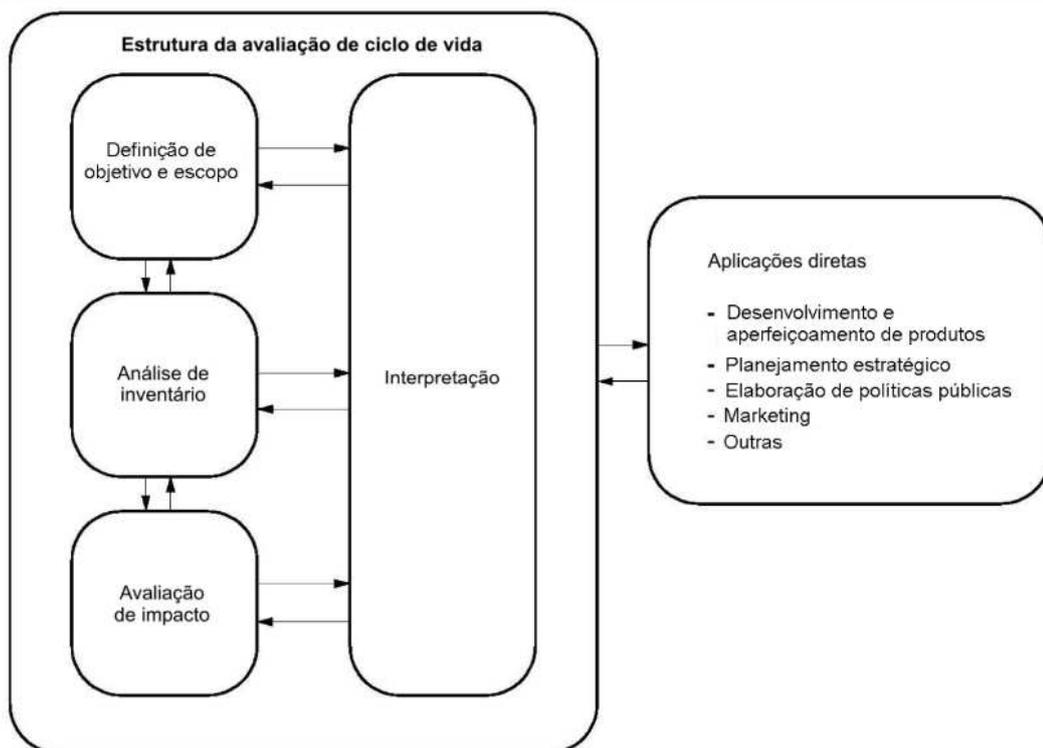
2.5 Avaliação do Ciclo de Vida

Com o afloramento das discussões sobre preservação ambiental e os impactos relacionados aos produtos, desde a fabricação de insumos até a destinação final, tem-se buscado desenvolver ferramentas que permitam compreender os impactos de forma mais eficaz. Dentre as ferramentas com este propósito, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma das que mais se destaca.

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) abrange a extração dos recursos necessários para a fabricação (“berço”) até o tratamento e a destinação após seu descarte (“túmulo”). Cada fase do ciclo de vida está associada ao consumo de recursos materiais e energia, além da emissão de resíduos e poluentes. O ciclo de vida é avaliado através de entradas (inputs) e saída (outputs) em todas as etapas, trazendo abordagens que permitem a compressão de questões sociais, econômicas e ambientais (MANZINI; VEZZOLI, 2005).

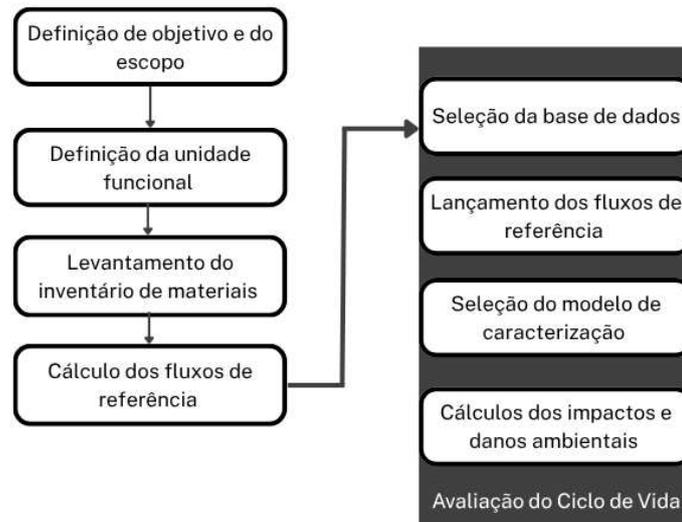
A ACV segue as normativas ABNT NBR ISO 14040:2016 e NBR ISO 14044:2016 e é composta por quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação dos resultados, conforme demonstrado na figura 2 (ABNT, 2009a, 2009b). Já na figura 3, está representado o esquema geral de funcionamento de uma Avaliação do Ciclo de Vida.

Figura 2 - Estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: (ABNT, 2009a)

Figura 3 - Esquema geral de funcionamento da Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: Autoria própria, 2025

A fase inicial é a definição de objetivo e escopo, que estabelece as bases para o estudo, definindo com clareza o objetivo e o escopo do trabalho. Isso inclui identificar a aplicação pretendida, as razões para a realização do estudo, o público-alvo e se os resultados serão usados em comparações públicas. O escopo abrange a descrição detalhada do sistema de produto, suas funções, a unidade funcional e as fronteiras do sistema. Também nessa etapa são especificados os critérios para inclusão ou exclusão de processos, ou seja, os limites do estudo, bem como a metodologia de avaliação e os requisitos de qualidade dos dados (ABNT, 2009a).

A análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) constitui a segunda fase da ACV, na qual ocorre a coleta e a quantificação de todos os fluxos de entrada (como energia, materiais e recursos) e de saída (emissões e resíduos) do sistema estudado (ABNT, 2009a).

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é a terceira etapa, onde o objetivo é fornecer informações adicionais que ajudem na interpretação dos resultados e no suporte à tomada de decisão através dos dados de impactos fornecidos pelas entradas e saídas do alvo do estudo (ABNT, 2009b). Nesse sentido, existem estudos onde a fase de AICV são excluídos, estes, são denominados estudos de ICV, que não deve ser confundido com a fase de análise de inventário ou de estudo de ACV (ABNT, 2009a). Geralmente, as informações desenvolvidas em um estudo de ACV ou ICV podem ser usadas como parte de um processo decisório mais abrangente. A

comparação dos resultados de diferentes estudos de ACV ou ICV só é possível se os pressupostos e o contexto de cada estudo forem equivalentes (ABNT, 2009a).

Por fim, a fase de interpretação é a fase de análise dos dados com foco no objetivo e ao escopo do estudo. Nesta fase, são identificadas as principais conclusões e as recomendações para ações futuras, cabe ressaltar, que é de suma importância a transparência e a consistência dos dados e métodos utilizados para garantir a confiabilidade do estudo (ABNT, 2009a, 2009b).

A Avaliação de Ciclo de Vida, pode ser feita através de diversas ferramentas, a exemplo, temos os softwares Gabi, Umberto, OpenLCA e o SimaPro. No entanto, a base literária das ACV, como NAIR e ANAD (2023) e AGHAMOHAMMAD et al., (2023) utilizam-se da ferramenta SimaPro. No software encontra-se duas formas de análise a de ponto médio (*Midpoint*) e ponto final (*Endpoint*). O Método de ponto médio avalia impactos intermediários, ou seja, no meio da cadeia de causa-efeito através de 18 categorias de impacto, algumas como: aquecimento global, acidificação, eutrofização etc, ou seja, ele possui maior relação com os fluxos ambientais. Já o método de ponto final avalia os impactos finais sobre 3 áreas, saúde humana, qualidade dos ecossistemas e recursos naturais (HUIJBREGTS, 2016).

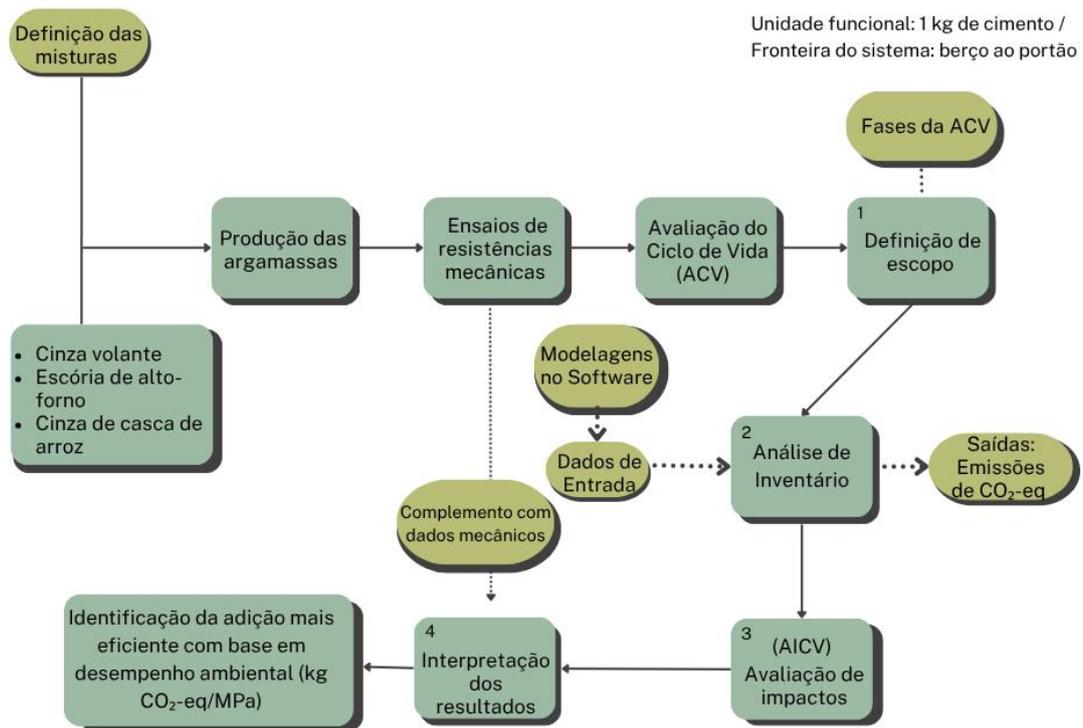
3 METODOLOGIA

Este estudo foi conduzido com uma abordagem experimental e analítica que envolveu a produção de diferentes composições de argamassa com substituições parciais de cimento por cinza de casca de arroz, escória de alto forno e cinza leve, além da Avaliação do Ciclo de Vida para quantificação de seu potencial de aquecimento global.

A Figura 4 demonstra os processos metodológicos deste estudo. Inicialmente foi realizado a caracterização das adições, estas adições e caracterizações foram todas fornecidas pela AT CONSULTORIA. Então definiu-se as misturas, ou seja, o teor de substituição de cada adição para a posterior produção das argamassas. Após a produção, desforma e cura em água com cal, realizou-se, aos 41 dias, os ensaios mecânicos de tração e compressão.

Posterior aos resultados mecânicos, conduziu-se a ACV partindo das suas quatro etapas, definição de objetivo e escopo onde é determinado o limite do sistema e a unidade funcional. A análise de inventário onde está é a etapa de modelagem das adições no software para a entrada dos dados no inventário e definição das saídas partindo desses dados de entrada. A AICV é a etapa onde, a partir dos dados de inventário, foi quantificado os seus impactos ambientais através das ferramentas (software) e a metodologia de análise. Por fim, feita a interpretação dos resultados de impactos ambientais gerados na etapa de AICV com base nos objetivos definidos na etapa inicial da ACV.

Figura 4 - Fluxograma dos processos metodológicos



Fonte: Autoria própria, 2025

3.1 Caracterização dos Materiais

3.1.1 Cimento Portland

Neste estudo, foi utilizado o cimento CP V ARI da marca Supremo, devido à sua maior pureza, que possibilitou níveis mais elevados de substituição do cimento. As composições químicas e físicas foram fornecidas pela Supremo Cimentos, conforme apresentado na tabela 1.

Tabela 1 – Composição química CPV - ARI

Componente Químico	Símbolo	Teor (%)	Limite (NBR 16697)
Perda ao Fogo	PF	4,2	≤ 6,5
Resíduo Insolúvel	RI	1,5	≤ 3,5
Óxido de Silício	SiO ₂	18,11	—
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	4,38	—
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	2,64	—
Óxido de Cálcio	CaO	58,61	—
Óxido de Magnésio	MgO	6,19	≤ 6,5
Sulfatos	SO ₃	2,82	≤ 4,5
Óxido de Potássio	K ₂ O	0,99	—
Óxido de Sódio	Na ₂ O	0,2	—

Cloretos	Cl ⁻	—	—
Anidrido Carbônico	CO ₂	2,92	≤ 5,5
Cal Livre	—	0,34	—
Fator de Saturação da Cal	—	101,76	—
Módulo de Sílica	—	2,58	—
Módulo de Alumina	—	1,66	—

Fonte: Supremo, 2025.

3.1.2 Adições

As três adições empregadas e suas caracterizações foram fornecidas pela AT CONSULTORIA, 2024.

3.1.3 Escória de alto forno

A composição química, realizada por fluorescência de raios X (FR-X), apresentada no quadro 4 demonstra que a escória de alto-forno é rica em SiO₂, CaO e Al₂O₃, assim, exibe propriedades hidráulicas e pozolânicas quando ativada, dependendo de sua estrutura vítrea (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

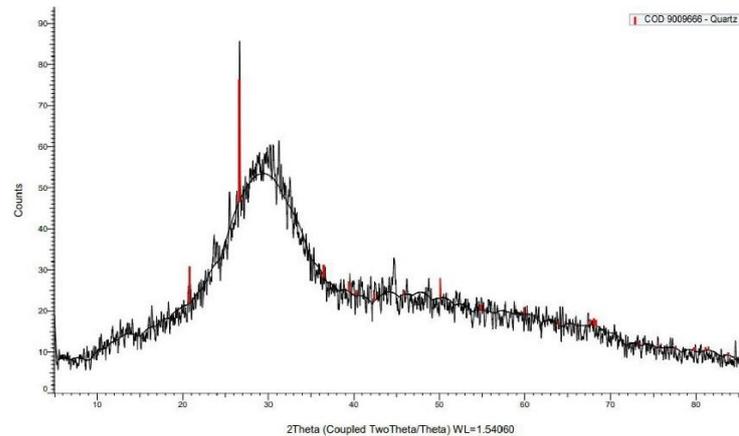
Quadro 4 - Composições químicas Escória de Alto Forno

	Nome Composto	Conc. (%)	Nome Composto	Conc. (%)	Nome Composto	Conc. (%)	Nome composto	Conc. (%)
1	SiO ₂	48,353	K ₂ O	0,886	SrO	0,201	P ₂ O ₅	0,036
2	CaO	35,232	MnO	0,798	SO ₃	0,195	Cr ₂ O ₃	0,018
3	Al ₂ O ₃	9,356	MgO	0,750	ZrO ₂	0,190	CuO	0,006
4	Fe ₂ O ₃	1,814	TiO ₂	0,713	Na ₂ O	0,084	ZnO	0,003
5	CO ₂	0,916	Cl ⁻	0,374	BaO	0,073	HfO ₂	0,000

Fonte: AT CONSULTORIA, 2024.

A adição foi classificada como ácida, com um índice CaO/SiO₂ de 0,79 (≤1). Além disso, apresentou 3,44% de material retido na peneira ABNT 325 (0,45 mm), demonstrando que a maioria das partículas é fina. A análise mineralógica por DR-X indica a presença de quartzo e um halo amorfo (Figura 5), indicando o potencial de reatividade da escória.

Figura 5 - Difratograma Escória de Alto Forno



Fonte: AT CONSULTORIA, 2024

Quadro 5 - Propriedades químicas Escória de Alto Forno

Propriedades Químicas	Unidade	Resultado
Perda ao fogo (PF)	%	0,02
Resíduo insolúvel em HCL (RI + SiO ₂)	%	1,35
Óxido de cálcio (CaO)	%	31,40
Óxido de magnésio (MgO)	%	9,26
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	%	0,23
pH	-	10,00
Umidade	%	0,03
Cloreto (Cl ⁻)	%	0,1063

Fonte: AT CONSULTORIA, 2024.

3.1.4 Cinza de casca de arroz

As propriedades químicas Cinza de Casca de Arroz estão presentes no Quadro 6, assim como os desempenhos nas exigências no Quadro 7 da NBR 12653:2014 (ABNT, 2015d); A CCA atende às exigências da NBR 12653 (2014) (ABNT, 2015d) para todas as classes (N, C e E), destacando-se pelo alto teor de óxidos pozolânicos e baixa presença de impurezas, o que a qualifica como um excelente material suplementar cimentício (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Segundo Zaparte (2020), a moagem da cinza de casca de arroz residual aumenta a sua superfície específica e promove melhores resultados de resistência a partir da densificação da microestrutura.

Quadro 6 - Propriedades químicas Cinza de Casca de Arroz

Propriedades Químicas	Unidade	Resultado	Resultados químicos NBR 12653:2014		
			N	C	E
Perda ao fogo (PF)	%	0,02	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Resíduo insolúvel em HCL (RI + SiO ₂)	%	1,35	-	-	-
Óxido de cálcio (CaO)	%	31,40	-	-	-
Óxido de magnésio (MgO)	%	9,26	-	-	-
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	%	0,23	≤ 4	≤ 5	≤ 5
pH	-	10,00	-	-	-
Umidade	%	0,03	-	-	-
Cloreto (Cl ⁻)	%	0,1063	≤ 3	≤ 3	≤ 3

Fonte: AT CONSULTORIA, 2024.

Quadro 7 - Exigências químicas das pozolanas Cinza de Casca de Arroz

Propriedades Químicas	Unidade	Resultado	Resultados químicos NBR 12653:2014		
			N	C	E
(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃) % mín.	%	87,238	70	70	50
Perda ao fogo (PF) % máx.	%	4,37	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Álcalis disponíveis (Na ₂ O) % máx.	%	0,000	1,5	1,5	1,5

Fonte: AT CONSULTORIA, 2024.

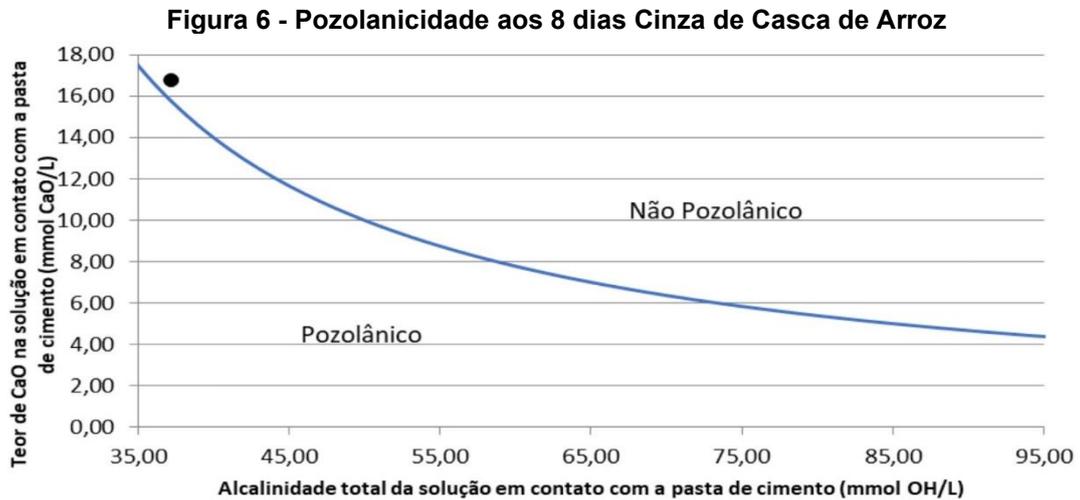
A análise de fluorescência de raios X (FRX) (Quadro 8) da cinza de casca de arroz (CCA) demonstra uma predominância de SiO₂, indicando uma alta capacidade de reação pozolânica. A CCA atende aos critérios da NBR 12653:2014, isso sugere que o material tem grande potencial como pozolana, sobretudo para a produção de cimentos compostos, desde que a sílica se apresente principalmente na forma amorfa e haja controle das impurezas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Quadro 8 - Composição química Cinza de Casca de Arroz

	Nome Composto	Conc. (%)	Nome Composto	Conc. (%)	Nome Composto	Conc. (%)	Nome composto	Conc. (%)
1	SiO ₂	86,018	Cl	0,781	SO ₃	0,232	ZrO ₂	0,000
2	CO ₂	3,712	Fe ₂ O ₃	0,713	TiO ₂	0,049	Na ₂ O	0,000
3	P ₂ O ₅	3,669	Al ₂ O ₃	0,507	ZnO	0,048		
4	K ₂ O	2,091	MgO	0,497	SrO	0,006		
5	CaO	1,312	MnO	0,359	PbO	0,004		

Fonte: AT CONSULTORIA, 2024.

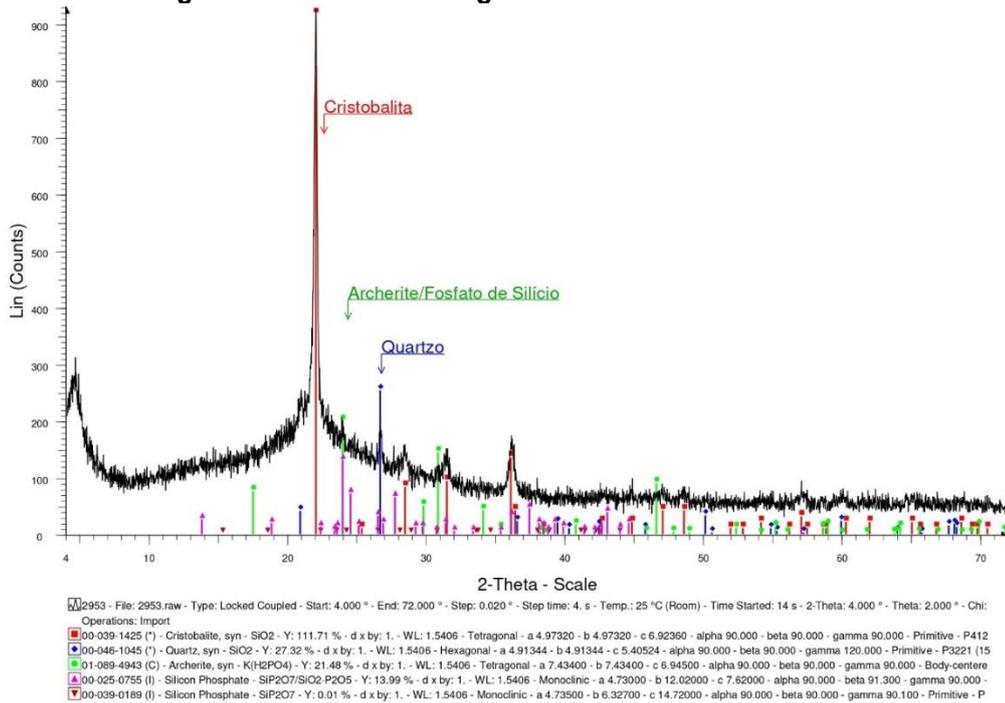
A Figura 6 demonstra a solubilidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aos 8 dias, com 20% de substituição, demonstra que a cinza não é pozolânica, pois seu ponto de deslocamento está acima da curva de saturação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$.



Fonte: AT CONSULORIA, 2024.

Já a análise por difração de raios X (Figura 7) revelou que a cristobalita é o principal constituinte da cinza de casca de arroz cristalina, a cristobalita é menos reativa do que a sílica amorfa (vítrea), o que reduz a reatividade pozolânica (BONAVETTI et al., 2020). Segundo Olivo (2020) temperaturas de queimas mais elevadas favorecem a formação da cristobalita, reduzindo a reatividade da CCA. Por outro lado, temperaturas mais baixas de queima tendem a preservar a estrutura amorfa da sílica, produzindo uma microestrutura mais homogênea nas argamassas.

Figura 7 - Fases mineralógicas Cinza de Casca de Arroz



Fonte: AT CONSULTORIA, 2024.

Figura 8 - Quantificação das fases mineralógicas Cinza de Casca de Arroz

Determinação da Quantificação das Fases Mineralógicas- PR-CR-192 - Data de Conclusão do(s) Ensaio(s): 19/07/2024		
	Fase Identificada	Quantificação
Fase 1	Quartzo	6,70
Fase 2	Cristobalita	89,59
Fase 3	Archerite/Fosfato de Cálcio	3,72
Un Trab	-	%
Observação	Contém alto teor de fase amorfa. Quantificação referente a fração cristalina.	
Observações	A quantificação das fases cristalinas identificadas na amostra foram realizadas pelo Método de Rietveld com GOF=1.43 e Rwp=14.5	
Parâmetros de Ensaio	O equipamento utilizado no ensaio é um Difratorômetro Bruker - D8 com goniômetro theta - theta. A radiação é Ka em tubo de cobre nas condições de 40kV e 40mA. A velocidade e o intervalo de varredura do goniômetro são de 4 segundos para 0,02° do goniômetro de 4° a 72° 2 theta, respectivamente.	

Local da Realização dos Ensaios: Instalação permanente do LDCM

Fonte: AT CONSULTORIA, 2024.

3.1.5 Cinza volante

A cinza volante utilizada provém da queima de carvão mineral em uma usina termelétrica localizada na região sul do Brasil. De acordo com AT CONSULTORIA (2024) a análise química por fluorescência de raios X (Quadro 9) mostra alto teor de SiO₂, confirmando sua natureza silicosa. O alto teor de sílica (superior a 50-60%) indica que a cinza possui potência de elevada reatividade pozolânica, desde que essa sílica seja amorfa, a cinza apresenta boa finura e seja curada em condições adequadas de temperatura e umidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Quadro 9 - Composição química Cinza Volante

	Nome Composto	Conc. (%)	Nome Composto	Conc. (%)	Nome Composto	Conc. (%)	Nome composto	Conc. (%)
1	SiO ₂	70,910	MgO	2,078	Cl	0,130	ZnO	0,013
2	Al ₂ O ₃	11,813	K ₂ O	1,754	P ₂ O ₅	0,064	PbO	0,008
3	CaO	4,130	CO ₂	1,240	ZrO ₂	0,032	SeO ₂	0,002
4	Fe ₂ O ₃	3,995	TiO ₂	0,750	SrO	0,015		
5	SO ₃	2,837	Na ₂ O	0,216	MnO	0,014		

Fonte: AT CONSULTORIA, 2024.

As propriedades químicas da adição no Quadro 10, assim como suas respectivas exigências conforme a NBR 12653 (2015) no Quadro 11. Já no Quadro 12 o índice de consistência.

Quadro 10 - Propriedades químicas Cinza Volante

Propriedades Químicas	Unidade	Resultado	Resultados químicos NBR 12653:2014		
			N	C	E
Perda ao fogo (PF)	%	0,92	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Resíduo insolúvel em HCL (RI + SiO ₂)	%	88,34	-	-	-
Óxido de cálcio (CaO)	%	0,78	-	-	-
Óxido de magnésio (MgO)	%	4,76	-	-	-
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	%	2,64	≤ 4	≤ 5	≤ 5
pH	-	2,12	-	-	-
Umidade	%	12,0	-	-	-
Cloreto (Cl ⁻)	%	0,31	≤ 3	≤ 3	≤ 3

Fonte: AT CONSULTORIA, 2024.

Quadro 11 - Exigências químicas Cinza Volante

Propriedades Químicas	Unidade	Resultado	Resultados químicos NBR 12653:2014		
			N	C	E
(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃) % mín.	%	86,718	70	70	50
Perda ao fogo (PF) % máx.	%	0,92	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Álcalis disponíveis (Na ₂ O) % máx.	%	0,216	1,5	1,5	1,5

Fonte: AT CONSULTORIA, 2024.

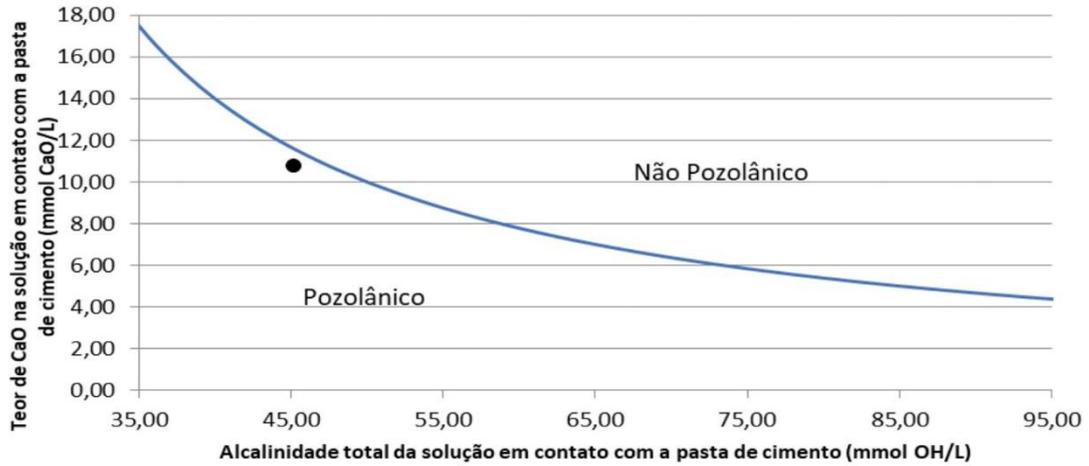
Quadro 12 - Índice de consistência

Índice de consistência	Requisito – NBR 5751
225 mm	225 ± 5 mm

Fonte: AT CONSULTORIA, 2024.

Em sequência, a Figura 9 demonstra a pozolanicidade da CV imersa aos 8 dias em álcalis, demonstrando a sua reatividade com o hidróxido de cálcio para formar produtos cimentícios.

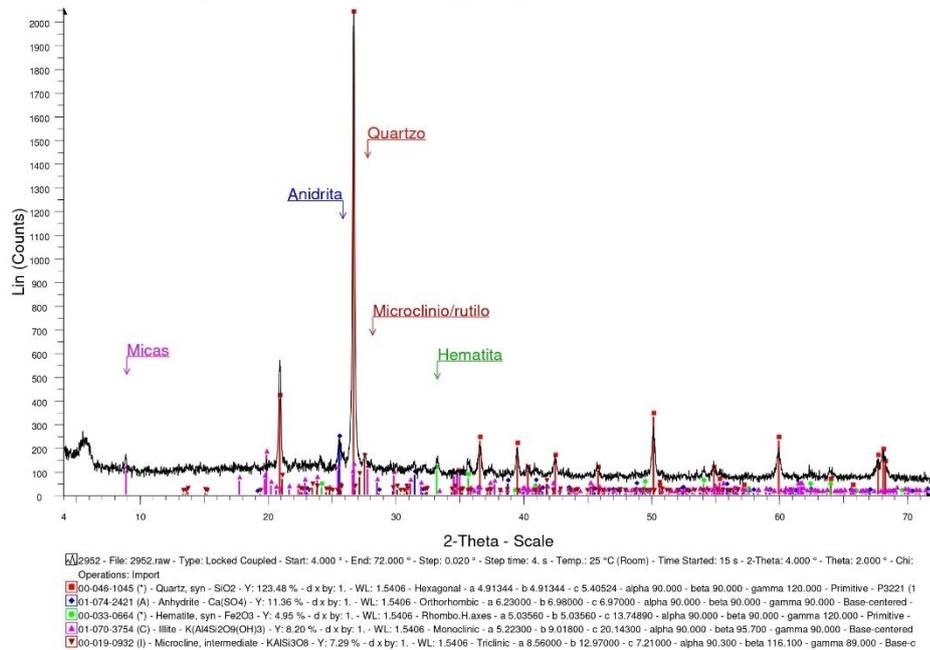
Figura 9 - Pozolanicidade aos 8 dias Cinza Volante



Fonte: AT CONSULTORIA, 2024.

A Figura 10, demonstra o DR-X da cinza volante, onde a adição demonstra picos de quartzo, com menores quantidades de anidrita, microclínio, hematita e micas. Embora a cinza mostre potencial pozolânico (como na Figura 9), a alta cristalinidade da sílica limita a sua reatividade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 10 - Fases mineralógicas Cinza Volante



Fonte: AT CONSULTORIA, 2024.

Figura 11 - Quantificação das Fases Mineralógicas Cinza Volante

Determinação da Quantificação das Fases Mineralógicas- PR-CR-192 - Data de Conclusão do(s) Ensaio(s): 19/07/2024		
	Fase Identificada	Quantificação
Fase 1	Quartzo	84,25
Fase 2	Anidrita	4,55
Fase 3	Hematita	3,59
Fase 4	Microclinio/Rutilo	4,79
Fase 5	Micas	2,82
Un Trab	-	%
Observações	A quantificação das fases cristalinas identificadas na amostra foram realizadas pelo Método de Rietveld com GOF=1.67 e Rwp=15.27	
Parâmetros de Ensaio	O equipamento utilizado no ensaio é um Difratorômetro Bruker - D8 com goniômetro theta - theta. A radiação é Ka em tubo de cobre nas condições de 40kV e 40mA. A velocidade e o intervalo de varredura do goniômetro são de 4 segundos para 0,02° do goniômetro de 4° a 72° 2 theta, respectivamente.	

Fonte: AT CONSULTORIA, 2024.

3.1.6 Agregado miúdo

Como agregado miúdo para a produção das argamassas utilizou-se a areia padrão ISO conforme determina a NBR 7214 (ABNT, 2015b).

3.2 Métodos

3.2.1 Definição das Misturas

As misturas foram elaboradas a partir do traço padrão da Normativa NBR 5752 (ABNT, 2014b), que termina um traço referência de 1:3:0,48 para fazer a substituição por materiais complementares, o traço referência, proveniente da normativa, é demonstrado na tabela 2. Nesse sentido, a NBR 16697 (ABNT, 2018c) apresenta os requisitos para o Cimento Portland delimitando os teores para as adições, assim, respeitando os limites possíveis, os teores de substituição do cimento Portland (CP) utilizados foram de 20%, 30% e 40% para Cinza de Casca de Arroz (CCA) e Cinza Volante (CV); e 30%, 50% e 70% para Escória de Alto-Forno (EAF).

Tabela 2 – Composição e consistência das misturas

Traço	CP (g)	CCA (g)	CV (g)	EAF (g)	Areia(g)	Água (g)	Aditivo (g)	Consistência Média (cm)
Referência	624	0	0	0	1872,00	300	0	19,0
CCA 20%	499,2	124,8	0	0	1872,00	300	2,49	17,0
CCA 30%	436,8	187,2	0	0	1872,00	300	3,15	17,8
CCA 40%	374,4	249,6	0	0	1872,00	300	4,86	20,6
CL 20%	499,2	0	124,8	0	1872,00	300	1,21	18,6

CL 30%	436,8	0	187,2	0	1872,00	300	1,87	18,4
CL 40%	374,4	0	249,6	0	1872,00	300	4,14	17,0
EAF 30%	436,8	0	0	187,2	1872,00	300	0	21,3
EAF 50%	312	0	0	312	1872,00	300	0	20,0
EAF 70%	187,2	0	0	436,8	1872,00	300	0	21,2

Fonte: autoria própria, 2025.

3.2.2 Preparo das argamassas

O traço utilizado nas argamassas seguiu o padrão 1:3:0,48 conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014b). Já o preparo destas, conforme a normativa NBR 7215 (ABNT, 2015c) sendo que os materiais aglomerantes foram pré-misturados em sacos plásticos por um período de um minuto. A máquina de mistura utilizada foi uma argamassadeira mecânica, onde a água foi colocada inicialmente e quando necessário para atingir a consistência do traço referência de 19 cm com variação de ± 2 cm foi misturada com aditivo super plastificante, seguido dos materiais aglomerantes e misturado por 30 segundos partir do contato do aglomerante com a água em velocidade baixa, posteriormente colocada as areias com tempo de 30 segundos também em velocidade baixa, então aumentado a velocidade para alta por 30 segundos, seguido de um descanso de 1 minutos e meio, por fim, uma velocidade de batida de 1 minuto na velocidade alta, assim como determinado pela NBR 7215 (2025).

Em seguida, realizou-se o espalhamento das misturas, onde tomou-se o espalhamento padrão da mistura referência com uma variação de ± 2 centímetros de consistência, os resultados dos testes de consistência estão na tabela 3 e o registro dos espalhamentos na Figura 12, a moldagem dos corpos de prova foi realizado em duas camadas sendo a primeira com 30 golpes e a segunda com 50 golpes de soquete e 10 golpes da mesa de adensamento por queda para cada camada, adaptando o trabalho de Langaro (2016).

Figura 12 - Ensaio de consistência das misturas



Fonte: autoria própria, 2025.

3.3 Ensaios de Propriedades Mecânicas

Os ensaios de resistência à tração na flexão e os ensaios de compressão axial foram realizados na idade de 41 dias, essa escolha foi motivada por questões logísticas e de cronograma da pesquisa, que impossibilitaram a realização dos ensaios na data de 28 dias que a NBR 5752 (ABNT, 2014b) preconiza para materiais pozolânicos. Contudo, este desvio de prazo não compromete a análise dos resultados, visto que a resistência à compressão continua se desenvolvendo ao longo do tempo, especialmente em misturas com materiais cimentícios suplementares. Para a realização dos ensaios, foram moldados 3 corpos de prova prismáticos com seção de 40x40 mm e comprimento de 160 mm para cada traço, com cura imersa em água saturada com cal, conforme a NBR 16738, 2019 (ABNT, 2019).

A metodologia empregada para definir as resistências a tração e compressão do trabalho seguiu a NBR 16738 (ABNT, 2019) para a realização dos ensaios de resistência à compressão e resistência a tração.

Para minimizar os efeitos de variação de resultados, realizou-se uma avaliação estatística dos dados experimentais. Para a resistência a compressão e para a tração, calculou-se a média, o desvio padrão e a variação relativa, como critério de controle utilizou-se uma limitação máxima de 15% para a variação relativa, que segundo Da Mata (2024) valores menores que esse percentual representa baixa dispersão dos dados. Quando a variação de um grupo ultrapassava esse limite, o valor responsável por esse desvio era classificado como espúrio e excluído da amostra. Assim, realizou-se uma nova média, novo desvio padrão e nova variação, resultando em dados mais consistentes e tecnicamente válidos para fins de comparação, o apêndice B demonstra os valores encontrados no tratamento estatístico.

3.4 Avaliação Ambiental

A condução da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem como objetivo quantificar o potencial de aquecimento global associado à produção das argamassas com diferentes teores de substituição do cimento por adições, como cinza de casca de arroz, escória de alto-forno e cinza volante.

A análise baseou-se em dados disponíveis no Ecolnvent 3.11, utilizando-se a ferramenta SimaPro, com escopo limitado do berço ao portão, ou seja, pré-operacional assim como em SUÁREZ SILGADO et al., (2024) e MANJUNATHA et al., (2021), considerando os resultados do efeito de ponto médio hierárquico em avaliar os impactos produzidos por cada constituinte da argamassa e seu processo.

3.4.1 Definição de objetivo e escopo

Neste estudo, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem como objetivo analisar o impacto ambiental da substituição parcial do cimento Portland por cinza volante, escória de alto forno e cinza de casca de arroz, abrangendo desde a extração de matérias-primas até a produção do cimento e das adições. O estudo buscou quantificar os benefícios ambientais dessa substituição parcial de cimento por adições.

Para a realização da ACV, a unidade funcional utilizada neste estudo foi a produção de 1 kg de cimento, assim como no estudo de SUÁREZ SILGADO et al., 2024. Os limites do sistema consideram uma fronteira do berço ao portão, ou seja, a extração das matérias-primas até a produção do cimento, incluindo o processamento das adições para torná-las utilizáveis, a água e a energia dos processos de pré-tratamento. Portanto, foram retiradas das análises na ferramenta, ou seja, do escopo do estudo, as etapas relacionadas ao transporte de matéria-prima e insumos, a utilização final do cimento em argamassas, e os impactos diretos e indiretos a longo prazo, seja pela infraestrutura fabril ou pelos equipamentos utilizados nos processos industriais.

Autores como: SUÁREZ SILGADO et al., 2024; DAS et al., 2022; VIEIRA, CALMON e COELHO, 2016 e QUISPE, NAVIA e KAHHAT, 2019 utilizam a abordagem de *Midpoint* no ReCiPe para comparar os compostos cimentícios com diferentes alternativas para a análise de potencial de aquecimento global (SUÁREZ SILGADO; et al., 2024).

3.4.2 Análise de inventário de ciclo de vida

Os dados utilizados para o quantitativo foram obtidos do banco EcoInvent 3.11 e a *Agri-footprint* 6.3 (alocação econômica). A EcoInvent é uma organização suíça responsável pela administração da principal base de dados internacional utilizada em Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (ACV Brasil, 2024). Já a *Agri-footprint*, foi desenvolvido por Mérieux Nutri Sciences Blonk, líder internacional em sustentabilidade alimentar, especializada nas complexidades da ACV agrícola (SimaPro, 2025).

Contudo, neste estudo, como não havia dados específicos sobre as cinzas de casca de arroz nem sobre a cinza volante nos bancos de dados da Ecoinvent foi necessário modelar as adições de cinza de casca de arroz e cinza volante manualmente utilizando dados do *Agri-footprint*. A Tabela 3 apresenta o inventário utilizado para a modelagem da produção de 1 kg dessas adições na ferramenta SimaPro, os dados processados foram retirados da companhia consultada e Wang et al., 2017 para Cinza Volante e SUÁREZ SILGADO et al., 2024 para a Cinza de Casca de Arroz. Cabe destacar que a maior parte das entradas foi selecionada a partir de processos padrão já disponíveis na base de dados do próprio software. A ordem de

prioridade para a escolha dos processos seguiu a seguinte hierarquia geográfica: Brasil (BR); Global (GLO); e Rest of World (RoW).

Tabela 3 – Materiais e Processos do SimaPro

Dados de Entrada CCA	Processos do SimaPro	Origem dos valores	Valores
Casca de arroz (kg)	Rice Husk (raw), at processing (CH) Cut-off, U	(SUÁREZ SILGADO et al., 2024)	3,33
Trituração de cinzas (Eletricidade) kWh	Electricity, médium voltage (BR Southern grid), Electricity voltage transformation from high to médium voltage Cut-off, U	(SUÁREZ SILGADO et al., 2024)	0,0067
Dados de entrada Cinza Volante			
Carvão Mineral (kg)	Bituminous Coal, At Mine (US)	Companhia consultada	3,03
Energia (kWh)	Electricity, high, Voltage (BR Southern grid) Electricity production, Hard Coal Cut-off, U	Companhia consultada	3,37
Água (kg)	Tap water (BR) tap water production, conventional treatment Cut-off, U	(Wang et al., 2017)	5,30E-03
Dados da Escória de alto-forno			
Escória de alto- forno quente	Blast furnace slag {RoW} Market for blast furnace slag Cut-off U	EcolInvent 3.11	1,0
Água (kg)	Tap water {BR} market for tap water Cut- off, U	EcolInvent 3.11	0,478

Fonte: autoria própria, 2025

3.4.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) foi realizada utilizando o software *System for Integrated Environmental Assessment of Products* (SimaPro), versão 10, com licença *Faculty*, e com base de dados do EcolInvent 3.11 e a Agri-footprint. A ferramenta de análise utilizada é o SimaPro, conforme utilizada por autores como Aghamohammad et al. (2023) e Nair e Anad (2023). O método de avaliação ReCiPe 2016 *Hierarchist* que considera um nível de abordagem de 100 anos. Esse

método utilizado abordagem de ponto médio que possui indicadores intermediários, como mudanças climáticas (dióxido de carbono), acidificação, escassez de recursos minerais e fósseis, e formação de material particulado. Contudo, o estudo ateve-se apenas ao potencial de aquecimento global (GWP) fornecido em kg CO₂-eq.

3.4.4 Interpretação

A interpretação dos dados parte da premissa de encontrar a adição ambientalmente mais sustentável e a que apresentou maior equilíbrio entre redução de emissão de dióxido de carbono equivalente em relação a sua resistência mecânica.

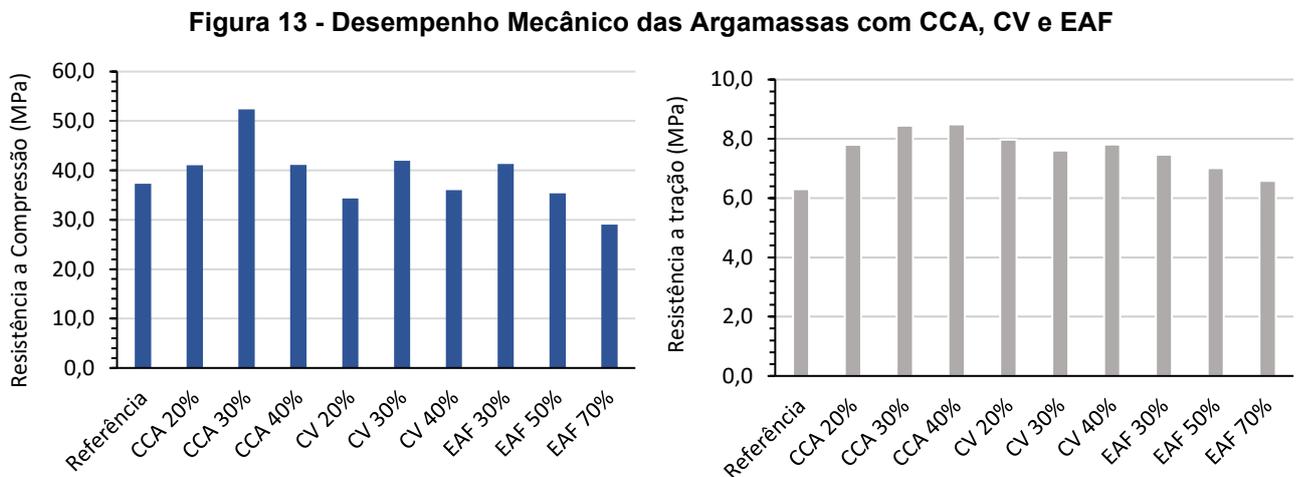
Para facilitar a compreensão, foi apresentada uma tabela contendo os valores globais dos impactos ambientais por quilograma de cimento, referentes a categoria *Global Warming* com base nos dados obtidos pela ferramenta SimaPro, com a finalidade de determinar a adição com menor emissão de dióxido de carbono equivalente. Cabe também destacar que o carbono equivalente é relacionado a conversão de todos os tipos de emissões globais do processo analisado em dióxido de carbono. Em seguida, com o objetivo de compreender a influência mecânica das adições foi elaborado gráficos que correlacionam a resistências de tração e à compressão das argamassas com o kg CO₂-eq, permitindo analisar a quantidade de dióxido de carbono equivalente emitida por mega pascal.

Diante desses resultados, foram identificadas as misturas de argamassas que apresentaram o menor impacto ambiental em relação a emissão de carbono equivalente, e a contribuição de cada adição no desempenho geral do material, considerando também os efeitos nas propriedades mecânicas.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Ensaios de tração na flexão e compressão

A Figura 13 apresenta os valores médios de resistência à tração na flexão e resistência a compressão das diferentes misturas aos 41 dias de cura, os valores também podem ser visualizados no apêndice A.



Fonte: autoria própria, 2025.

Após a exclusão de duas resistências à compressão, assim como demonstrado no apêndice B. Com os dados tratados, observa-se que as argamassas com substituição parcial do cimento por adições apresentaram desempenho superior em comparação à referência (CP V ARI) aos 41 dias, sobretudo nas proporções de 30% e 40%, conforme observado na tabela 4. Nessas proporções verificou-se um aumento significativo da resistência à compressão e à tração, possivelmente segundo Neville (2011) à maior reatividade dos materiais ao meio alcalino que geram compostos secundários de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), conferindo a estrutura menor porosidade e coesão à matriz cimentícia. A Figura 13 demonstra que, entre as adições, de CCA 30% e CCA 40% destacam-se com resistências à tração superiores à 8,0 MPa e à compressão superiores a 40 MPa, enquanto teores de 20% (ex.: CV 20), apresentam um desempenho inferior, principalmente em relação a resistência a compressão, demonstrando que o teor de substituição ideal esteja entre 30% e 40%.

Tabela 4 – Variação Percentual das Resistências em relação ao Referência

Traço	Resis. Tração média (%)	Resis. Comp. Média (%)
CCA 20%	24	10
CCA 30%	34	40
CCA 40%	35	10
CV 20%	27	-8
CV 30%	21	13
CV 40%	24	-3
EAF 30%	19	11
EAF 50%	11	-5
EAF 70%	4	-22

Fonte: autoria própria, 2025.

Para as formulações com cinza volante, a resistência à compressão mostrou-se próxima à da amostra de referência nos teores de 20% e 40%, já o teor de 30% apresentou um aumento de aproximadamente 13%, já na tração o ganho de resistência foi significativo, chegando à 27% assim como demonstrado na tabela 4. Apesar desses resultados, a cinza volante em teores de 20% e 40% pode ser considerada em aplicações onde a exigência de desempenho mecânico é menos rigorosa, por conta da variação de desempenho observada entre os teores analisados.

No caso das argamassas com escória de alto-forno, os teores de 30% e 50% mantiveram aumento perante à referência, porém em proporções menores, com ganho máximo de 19% de resistência a tração e 11% de resistência a compressão no teor de substituição de 30%. Contudo, a substituição de 70% resultou em queda expressiva da resistência a compressão e baixa representatividade em ganho de resistência a tração, indicando a necessidade de controle da granulometria quando se utilizam teores elevados. Conforme Neville (2011) quando em teores muito altos, a matriz depende quase exclusivamente da ativação da escória, que pode não ocorrer de forma suficiente, ou seja, teores mais elevados de substituição necessitam de maior finura.

Já para as misturas com cinza de casca de arroz, o ganho de resistência a compressão foi expressivo, chegando a 40% maior do que o traço referência, demonstrando a alta reatividade do material principalmente no teor de 30% de substituição do cimento. O estudo de Zaparte (2020) observou melhora de resistência do CCA quando era submetido à moagem, o que aumenta a sua área superficial e favorece reações pozolânicas. Assim, reforçando os resultados encontrados. Outra possível explicação para os bons resultados da CCA é a reatividade das partículas na

hidratação, segundo Olivo (2020), a CCA calcinada a temperaturas de 300-500°C possuem liberação de calor mais gradual, o que pode indicar hidratação mais estável e eficiente. Ainda que este estudo não contemple a calorimetria, os bons resultados de ganho de resistência podem estar associados a uma cinza com comportamento semelhante.

4.2 Análise de impactos ambientais

4.2.1 Análise das alternativas com menores emissões de CO₂-eq

Em relação aos impactos ambientais, a Tabela 5 sintetiza os resultados para a categoria de impacto "*Global warming*" que representa a emissão de dióxido de carbono equivalente na atmosfera. A substituição de 70% por EAF destacou-se como a alternativa com melhor desempenho ambiental, resultando em 0,261 kg CO₂-eq por kg de argamassa, contra 0,717 kg CO₂-eq da referência — uma redução de aproximadamente 63,6%. As composições com CV e CCA também apresentaram desempenho ambiental favorável, especialmente em teores mais elevados.

Tabela 5 – Impactos Ambientais do SimaPro por Categoria e Tipo de Adição

Categoria de impacto	Unidade	CCA 20%	CCA 30%	CCA 40%	CV 20%	CV 30%	CV 40%	EAF 30%	EAF 50%	EAF 70%	CP V ARI RS
Global Warming	kg CO ₂ -eq	0,642	0,606	0,569	1,47	1,85	2,23	0,596	0,429	0,261	0,717

Fonte: autoria própria, 2025.

Adicionalmente, foi analisado o processo isolado "Rice Husk (raw), at processing (CH) | Cut-off, U" na ferramenta SimaPro, com a finalidade de identificar se o dado utilizado de um contexto chinês teria uma consistência condizente com a literatura. A análise deste, forneceu uma emissão no impacto "*GWP*" 0,261 quilos de dióxido de carbono equivalentes, sendo um resultado coerente em comparação ao estudo de SUÁREZ SILGADO et al., (2024) que traz 0,27 como valor de emissão equivalente.

A análise da adição de cinza volante – que também foi modelada no SimaPro por conta da inexistência de dados – demonstrou maior emissão de dióxido de carbono equivalente dentre as estudadas. Por consequência, analisou-se a energia na fabricação da adição e modelada pelo processo "Electricity, high, Voltage (BR

Southern grid) Electricity production, Hard Coal | Cut-off, U” e determinou-se como um possível responsável dos valores apresentados, a utilização do carvão mineral para a produção de energia da usina termoelétrica, a tabela 6 evidencia a emissão de dióxido de carbono atrelado a um quilowatt hora de carvão mineral em comparação ao gasto energético para a produção do CP V ARI.

Tabela 6 – Comparação entre 1 kWh da CV e CP V ARI

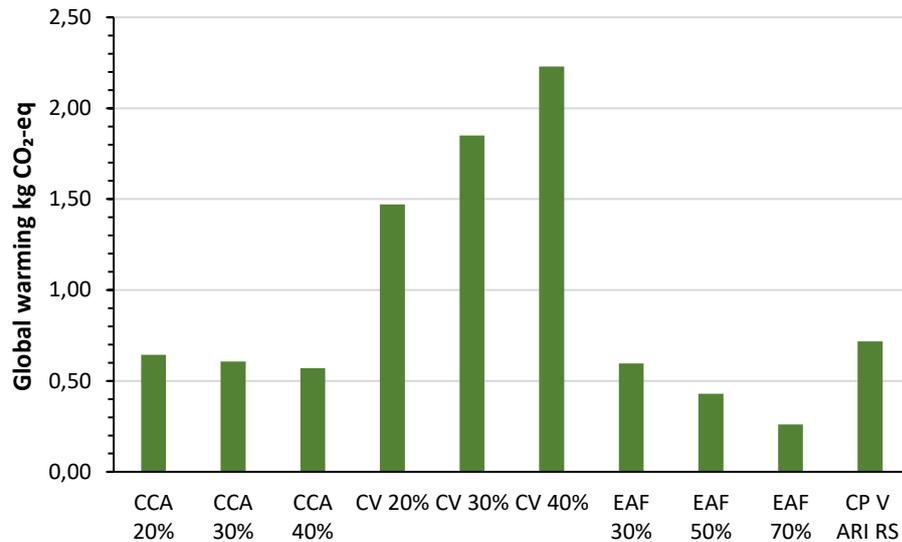
Categoria de impacto	Unidade	(Processo Cinza Volante)	(Processo CP V ARI)
		Electricity, high, Voltage (BR Southern grid) Electricity production, Hard Coal Cut-off, U	Electricity, medium, Voltage (BR) market Cut-off, U
Global Warming	kg CO ₂ -eq	0,339	0,209

Fonte: autoria própria, 2025.

Assim, infere-se que a produção de 1 kWh do processo de Cinza Volante tem uma emissão de dióxido de carbono equivalente de aproximadamente 62% maior do que a produção do CP V ARI. Outro dado que confirma esse impacto maior na produção da cinza volante é a quantidade de energia utilizado pela base de dados da Ecolnvent 3.11 para a produção de CP V ARI. Na base de dados, encontra-se aproximadamente 0,056 kWh para a produção de um quilograma de CP V ARI, já para a produção de um quilograma de Cinza Volante, de acordo com a companhia consultada é necessário 3,37 kWh, reforçando que o impacto ambiental está atrelado ao gasto energético do carvão mineral.

Portanto, através da Figura 14, percebe-se a magnitude da comparação de kg CO₂- eq por e percentual de adição.

Figura 14 - Emissão de dióxido de carbono (kg CO₂-eq) por tipo de adição



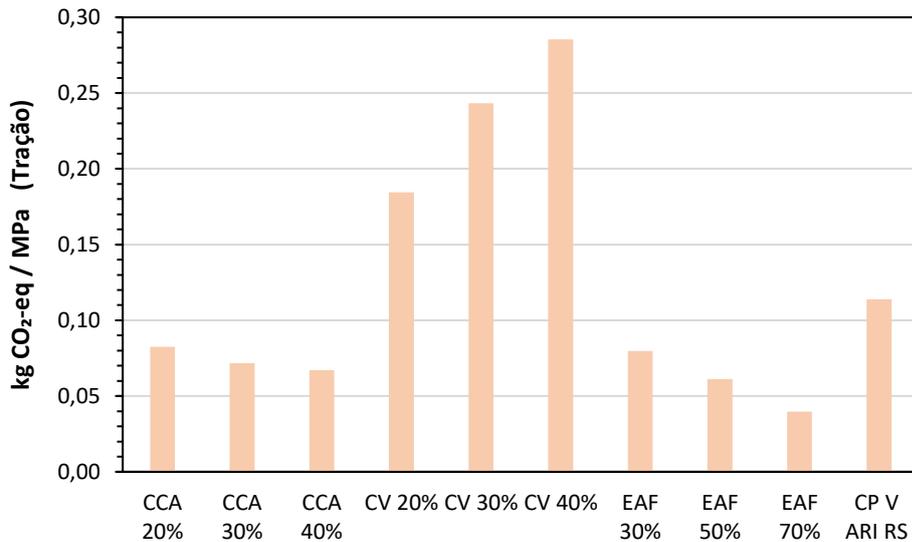
Fonte: autoria própria, 2025.

Em análise, as misturas com escória de alto-forno (EAF), particularmente na proporção de 50% e 70%, apresentaram o menor impacto ambiental, com emissões de apenas 0,429 e 0,261 kg CO₂-eq por kg de argamassa, representando uma redução de 40% e 63,6% respectivamente em relação ao traço de referência. A cinza de casca de arroz (CCA), embora não tenha atingido os mesmos níveis de redução, ainda contribuiu com reduções, em torno de 0,569 kg CO₂-eq no teor de 40%. Em relação as cinzas volantes, os valores expressos decorrem da origem da cinza, uma vez que ela é gerada a partir da queima de carvão mineral de usinas termoelétricas, processo este que é intensivo em emissões de CO₂, o que reflete no maior impacto atrelado a este material.

4.2.2 Avaliação Ambiental: CO₂-eq por Unidade de Resistência (MPa)

Um projeto sustentável visa equilibrar a sustentabilidade com desempenho estrutural. Como ferramenta de apoio a essa decisão, a Figura 15 e 16 demonstram a relação da emissão de kgCO₂-eq por unidade de resistência à tração e à compressão, ambas em MPa.

Figura 15 - CO₂-eq por unidade de Resistência (MPa) na tração

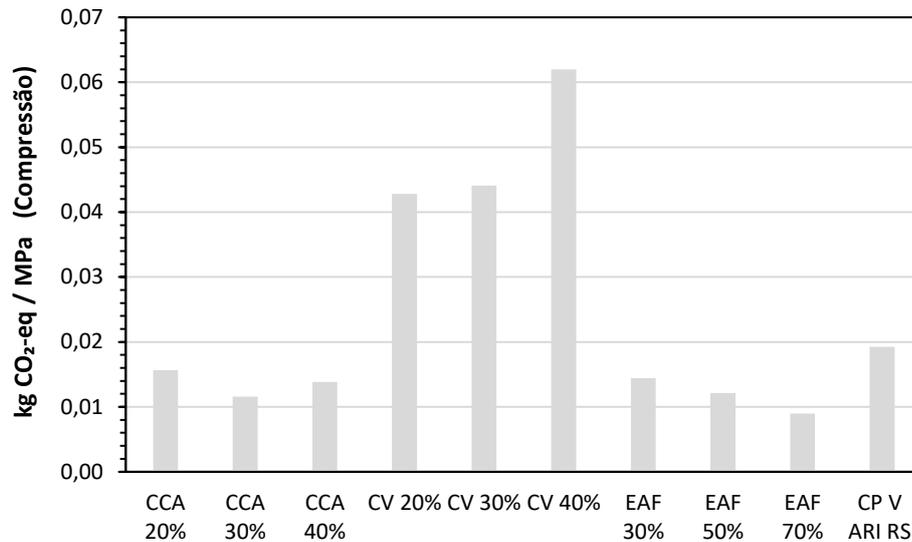


Fonte: autoria própria, 2025.

Na Figura 15, referente à tração, verifica-se que a mistura com EAF 70% obteve o melhor desempenho em relação a emissão por mega pascal, fato que se deve a seus baixos valores de kg CO₂-eq contudo, é possível observar que a variação dos teores de substituição, alteram o seu desempenho mecânico. A CCA demonstrou resultados intermediários, com destaque para o traço com 40%, enquanto a cinza volante maiores emissões principalmente nos teores mais altos de substituição, reforçando a prerrogativa de quanto maior a substituição do cimento, maior a emissão em decorrência do aumento da necessidade de carvão mineral que demanda alta energia.

Outro fator importante a ser analisado é a resistência à compressão das argamassas contendo adições em relação a sua emissão. Nessa ótica, a figura 18 demonstra a emissão de dióxido de carbono equivalente pela resistência a compressão das misturas nos diferentes teores.

Figura 16 - CO₂-eq por unidade de Resistência (MPa) na compressão



Fonte: autoria própria, 2025.

Para uma análise mais equitativa e compreensível da influência de cada adição, foi adotado o teor de substituição comum entre todas as adições, permitindo comparar seus desempenhos sob a mesma condição. Nesse teor, conforme a figura 16, a cinza de casca de arroz, demonstrou ser a adição com menor teor de emissão de dióxido de carbono equivalente por resistência a compressão, teor que decorre de a CCA ter apresentado a melhor resistência a compressão entre as três adições e a menor emissividade de dióxido de carbono equivalente no teor comum a todas as adições.

Também, destaca-se na figura 16, a baixa variabilidade dos teores de 20% de cinza volante para o teor de 30% de CV relação dióxido de carbono equivalente por mega pascal, sendo um dos maiores responsáveis, o teor de 30% ter apresentado maior resistência a compressão do que o teor de 20% dessa substituição.

Já para a Escória de alto-forno, percebe-se a variação decrescente na razão emissão de dióxido de carbono equivalente/MPa em relação ao teor de substituição. Isso indica, que quanto maior o teor de substituição, menor a relação dióxido de carbono equivalente/MPa decorrente da baixa emissividade atrelada à substituição dessa adição.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou avaliar o desempenho ambiental e mecânico de argamassas de cimentos elaborados com adição (cinza de casca de arroz, escória de alto-forno e cinza volante) em substituições parciais ao cimento Portland, com base em uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) utilizando o método ReCiPe 2016 *Midpoint Hierarchist* e ensaios de resistência à tração e à compressão.

Sobre a perspectiva de emissão de dióxido de carbono equivalente na atmosfera a substituição parcial do cimento por adições resultou em redução em relação ao Cimento Portland, em especial com a escória de alto forno com redução de 64% de emissões no teor de substituição de 70%. Em contra partida, esse teor de apresentou o menor valor médio de resistência à compressão com valor 29,04 MPa (abaixo do limite da norma, de 32 MPa) e o segundo menor valor de resistência a tração com 6,58 MPa dentre as adições estudadas, requerendo cuidado com teores de substituição elevados.

Já a CCA demonstrou-se o material mais equilibrada em termos de eficiência ambiental, apresentando uma redução de aproximadamente 21% em emissões para a atmosfera na proporção de 40% de substituição e uma resistência mecânica de 41,07 MPa à compressão e 8,49 MPa de resistência a tração, tendo como destaque a mistura de 30% de substituição com 52,32 MPa de resistência a compressão e 8,44 MPa de tração, reforçando a vantagem mecânica da substituição principalmente a longo prazo.

Nesse contexto, a cinza volante, também apresentou grandes resistências mecânicas principalmente no teor de 30% e 40% com 41,95 e 35,97 MPa de resistência a compressão e 7,60 MPa e 7,81 MPa a tração respectivamente, reforçando seu caráter pozolânico. Contudo, os impactos atribuídos à adição tendem a ser ampliados devido à baixa eficiência operacional das termoelétricas na geração do material, sendo assim, os valores demonstram o contexto de produção do que o real potencial da cinza como material sustentável.

Portanto, conclui-se que a substituição parcial do cimento Portland por cinza de casca de arroz, cinza volante e escória de alto forno tem alto impacto sobre o desempenho mecânico e o potencial de aquecimento global do cimento. Destaca-se a CCA como a adição com maior equilíbrio entre resistências e emissões,

especialmente no teor de 30%. A EAF, apesar de apresentar a menor emissão demonstrou a maior dependência do teor de substituição entre as adições. Já a CV, apesar de apresentar maior impacto ambiental associado à sua origem, mostra um bom desempenho mecânico no teor de 30%, considerado ideal para a adição. Diante dos resultados, o teor de 30% de substituição apresentou o melhor equilíbrio entre sustentabilidade e desempenho mecânico, promovendo a utilização de resíduos, que são inevitavelmente produzidos, evita descarte inadequado e diminuem a demanda por cimento Portland.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697:2018. Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653:2014. Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752:2014. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5751:2012. Cimento Portland – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214:2015. Agregado miúdo – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 7215. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16738:2019. Argamassa e concreto – Determinação da resistência à compressão e à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040:2009. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044:2009. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009.

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. Guia básico de utilização do cimento Portland. São Paulo: ABCP, 2002.

ACV BRASIL. Ecoinvent. Disponível em: <https://acvbrasil.com.br/software/ecoinvent>. Acesso em: 10 fev. 2025.

AGHAMOHAMMAD, Omid et al. Novel eco-friendly high-strength concrete based on slag activated with calcium oxide: environmental, thermal, and mechanical performance. *SSRN*, 23 ago. 2023.

AGUIERRI, Cibele. O que foi o Protocolo de Quioto e o que é o Acordo de Paris? São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/o-que-foi-o-protocolo-de-quioto-e-o-que-e-o-acordo-de-paris/>. Acesso em: 16 jun. 2025.

ALMEIDA, E. P.; GOMES, W. C. Reutilização das cinzas volantes de carvão mineral na fabricação de cimento de Portland. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, 2021.

AT CONSULTORIA LTDA. Relatório de ensaio nº 03.0206.2024-C.QUI. Análise de cinza de casca de arroz. Laboratório CDtec, 2024.

AT CONSULTORIA LTDA. Relatório de ensaio nº 02.0206.2024-C.QUI. Análise de cinza de termoelétrica por difração de raios X (DRX). Laboratório CDtec, 2024.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. Uma breve história do cimento Portland. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2025. Disponível em: <https://abcp.org.br/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>. Acesso em: 16 jun. 2025.

BONAVETTI, V. L. et al. Pozzolanic activity of argentine vitreous breccia containing mordenite. *Materiales de Construcción*, Madrid, v. 70, n. 337, e208, jan./mar. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/339318539_Pozzolanic_activity_of_argentine_vitreous_breccia_containing_mordenite. Acesso em: 2 jul. 2025.

CALVIN, Katherine et al. *Climate change 2023: synthesis report. Summary for policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 17 jun. 2025.

CHEN, C. et al. LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: an application to mineral additions in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 54, n. 12, p. 1231–1240, 2010.

CNI – Confederação Nacional da Indústria; ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. *Indústria brasileira de cimento: base para a construção do desenvolvimento*. Brasília, 2017.

DA COSTA, Eugênio Bastos et al. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, n. 2, p. 75–86, 2005.

DAS, Priyadarshini et al. Performance assessment and life cycle analysis of concrete containing ferrochrome slag and fly ash as replacement materials – A circular approach. *Construction and Building Materials*, v. 347, 12 set. 2022.

DAMATA, Rodrigo. *Análise estatística de ensaios à compressão de blocos de concreto*. Disponível em: <https://rodrigodamata.com.br/index.php/2024/03/13/analise-estatistica-de-ensaios-a-compressao-de-blocos-de-concreto/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

FARIAS, Marcelo Martins; FARIAS, Celestina Lima de Rezende; PICANÇO, Marcelo de Souza. Blast furnace slag as a partial replacement for Portland cement. *Revista Materia*, v. 28, n. 2, 2023.

FRARE, Andreza. *Cimentos álcali ativados: efeito da cura térmica no desenvolvimento da resistência mecânica*. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco.

HOFFMANN, R.; JAHN, S. L.; BAVARESCO, M.; SARTORI, T. C. Aproveitamento da cinza produzida na combustão da casca de arroz: estado da arte. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria – Centro de Tecnologia – Departamento de Engenharia Química, 2020.

HUIJBREGTS, M. A. J. *ReCiPe 2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level – Report I: characterization*. 2016.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate change 2022 – impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

KURDA, Rawaz; SILVESTRE, José D.; DE BRITO, Jorge. Toxicity and environmental and economic performance of fly ash and recycled concrete aggregates use in concrete: a review. *Heliyon*, v. 4, n. 4, p. e00611, 1 abr. 2018.

LANGARO, Eloise Aparecida. *Cimento álcali ativado a partir da valorização da escória de alto forno a carvão vegetal*. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MANJUNATHA, M. et al. Life cycle assessment (LCA) of concrete prepared with sustainable cement-based materials. *Materials Today: Proceedings*, v. 47, p. 3637–3644, 1 jan. 2021.

MANZINI, Enzo; VEZZOLI, Carlo. *Desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais*. São Paulo: Edusp, 2005.

MASSUCATO, Carlos José. *Utilização da escória de alto-forno à carvão vegetal como adição no concreto*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 4. ed. Nova York: McGraw-Hill Education, 2014.

NAIR, Kavya A.; ANAD, Kalpathy Balakrishnan. Sustainability of alternative concretes: energy and life-cycle analysis. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, v. 177, n. 4, p. 217–229, 21 set. 2023.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 5. ed. Londres: Pearson Education, 2011.

NIE, S.; ZHOU, J.; YANG, F.; LAN, M.; LI, J.; ZHANG, Z.; CHEN, Z.; XU, M.; LI, H.; SANJAYAN, J. G. Analysis of theoretical carbon dioxide emissions from cement production: Methodology and application. *Journal of Cleaner Production*, v. 334, 130270, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130270>.

OLIVO, Paola. *Estudo da influência da temperatura de queima da casca de arroz no desempenho da argamassa de revestimento*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020.

PAL, S. C.; MUKHERJEE, A.; PATHAK, S. R. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 9, p. 1481–1486, 1 set. 2003.

PASSUELLO, Ana Carolina Badalotti et al. Avaliação do ciclo de vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: pegada de carbono de clínquers alternativos. *Revista Ambiente Construído*, v. 14, p. 7–20, out. 2014.

QUISPE, Isabel; NAVIA, Rodrigo; KAHHAT, Ramzy. Life cycle assessment of rice husk as an energy source: a Peruvian case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 209, p. 1235–1244, 1 fev. 2019.

ROOTZÉN, Johan; JOHNSON, Filip. Managing the costs of CO₂ abatement in the cement industry. *Climate Policy*, v. 17, n. 6, p. 781–800, 18 ago. 2017.

SABIR, B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, v. 23, n. 6, p. 441–454, 1 dez. 2001

SILGADO, S. S. Suárez; VALDIVIEZO, L. Calderón; QUIROGA, C. Betancourt. Life cycle analysis and economic evaluation of cement and concrete mixes with rice husk ash: application to the Colombian context. *Materiales de Construcción*, v. 74, n. 353, 2024.

SILVA, Valéria Rossi Rodrigues da. *A evolução do conceito sustentabilidade e a repercussão na mídia impressa do país*. 2012. Dissertação (Mestrado em Comunicação e Semiótica) – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo.

SIMAPRO. Agri-footprint database. Amersfoort: PRé Sustainability, 2025. Disponível em: <https://simapro.com/products/agri-footprint-database/>. Acesso em: 16 jun. 2025.

SINGH, N. B.; CHATURVEDI, Shivani; RAI, Sarita. Chemistry of Portland cement. *Journal of the Indian Chemical Society*, v. 80, p. 319–325, abr. 2003.

SIVAKRISHNA, A. et al. Green concrete: a review of recent developments. *Materials Today: Proceedings*, v. 27, p. 54–58, 1 jan. 2020.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento; ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. *Segundo inventário brasileiro de emissões e remoções*

antrópicas de gases de efeito estufa: emissões nos processos industriais – produtos minerais. Brasília, 2010. (Nota técnica).

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento; ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Coordenação: Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. 64 p.

SUÁREZ SILGADO, S. S.; CALDERÓN VALDIVIEZO, L.; BETANCOURT QUIROGA, C. Life cycle analysis and economic evaluation of cement and concrete mixes with rice husk ash: application to the Colombian context. *Materiales de Construcción*, v. 74, n. 353, 2024a.

SUÁREZ SILGADO, S. S.; CALDERÓN VALDIVIEZO, L.; BETANCOURT QUIROGA, C. Life cycle analysis and economic evaluation of cement and concrete mixes with rice husk ash: application to the Colombian context. *Materiales de Construcción*, v. 74, n. 353, 2024b.

TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry*. London: T. Telford, 1998.

TEIXEIRA, Elisabete R. et al. Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 2221–2230, 2016.

TERÁN-CUADRADO, Glenda et al. Current and potential materials for the low-carbon cement production: life cycle assessment perspective. *Journal of Building Engineering*, v. 96, p. 110528, 1 nov. 2024.

UNEP – United Nations Environment Programme. *2020 Global Status Report for Buildings and Construction: towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*. Nairobi: UNEP, 2020. Disponível em: <http://www.un.org/Depts/>. Acesso em: 17 jun. 2025.

VIEIRA, Darli Rodrigues; CALMON, João Luiz; COELHO, Felipe Zanellato. Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: a review. *Construction and Building Materials*, v. 124, p. 656–666, 15 out. 2016.

VISEDO, Gonzalo; PECCHIO, Marcelo. *Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050*. SNIC, 2019.

WANG, Jing Jing et al. Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.

ZAPARTE, Taiara Aparecida. *Análise global da influência da finura da cinza de casca de arroz como substituição parcial ao cimento Portland nas propriedades da argamassa de revestimento*. 2020. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020.

APÊNDICE A

Neste apêndice é demonstrado os valores de tração e compressão média conforme os respectivos traços com comparação de suas consistências médias a fim de facilitar a compressão da influência da consistência média nos ensaios mecânicos.

Traço	Resis. Tração média (MPa)	Resis. Comp. Média (MPa)	Consistência média (cm)
Referência	6,30	37,27	19
CCA 20%	7,79	41,02	17
CCA 30%	8,44	52,32	17,8
CCA 40%	8,49	41,07	20,6
CV 20%	7,97	34,34	18,6
CV 30%	7,60	41,95	18,4
CV 40%	7,81	35,97	17
EAF 30%	7,47	41,32	21,3
EAF 50%	7,01	35,34	20
EAF 70%	6,58	29,04	21,2

APÊNDICE B

A tabela a baixo demonstra o tratamento estatístico, ou seja, a média das resistências, o desvio padrão para as respectivas, o coeficiente de variação e a validação dos dados.

Traço	Resis. Tração média (MPa)	Resis. Comp. Média (MPa)	Desv. Pad. Tração	Desv. Pad. Comp.	Coef. Var. Tração	Coef. Var. Comp.	Validação Tração	Validação Comp.
Referência	6,30	37,27	0,14	7,97	2,30	21,39	Ok	Não ok
CCA 20%	7,79	41,02	0,43	3,27	5,48	7,97	Ok	Ok
CCA 30%	8,44	52,32	0,86	1,63	10,23	3,11	Ok	Ok
CCA 40%	8,49	41,07	0,84	0,58	9,95	1,42	Ok	Ok
CV 20%	7,97	34,34	0,18	11,22	2,25	32,68	Ok	Não ok
CV 30%	7,60	41,95	1,07	1,22	14,05	2,91	Ok	Ok
CV 40%	7,81	35,97	0,30	2,37	3,85	6,58	Ok	Ok
EAF 30%	7,47	41,32	0,46	1,72	6,19	4,17	Ok	Ok
EAF 50%	7,01	35,34	0,40	2,32	5,75	6,55	Ok	Ok
EAF 70%	6,58	29,04	0,24	1,13	3,57	3,87	Ok	Ok

Já na tabela inferior, o resultado apresentado após a exclusão de valores espúrios.

Traço	Resist. Comp. Média (MPa)	Desv. Pad. Comp.	Coef. Var. Comp.	Validação
Referência	41,87	0,49	1,17	Ok
CV 20%	40,81	0,88	2,17	Ok