



Caroline Vieira Marçal

**OTIMIZAÇÃO DA PROPORÇÃO DE
MATERIAL-PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE
CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO
INDUSTRIALIZADO NO OESTE
MARANHENSE.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Dr. Alcebíades Negrão Macêdo

Belém – Pará – Brasil

2025

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



Caroline Vieira Marçal

**OTIMIZAÇÃO DA PROPORÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS PARA
PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO
INDUSTRIALIZADO NO OESTE MARANHENSE.**

Dissertação de Mestrado

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macedo

Belém/PA

Agosto de 2025



OTIMIZAÇÃO DA PROPORÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO, INDUSTRIALIZADO NO OESTE MARANHENSE

AUTORA:

CAROLINE VIEIRA MARÇAL

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 08 / 08 / 2025.

Documento assinado digitalmente

gov.br ALCEBIADES NEGRAO MACEDO
Data: 25/08/2025 09:56:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo
Orientador (UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br MATEUS ANTONIO NOGUEIRA OLIVEIRA
Data: 19/08/2025 14:36:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira
Membro Externo (UFMG)

Documento assinado digitalmente
gov.br RODRIGO RODRIGUES DA CUNHA
Data: 13/08/2025 11:56:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rodrigo Rodrigues da Cunha
Membro Externo (IFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCELO DE SOUZA PICANCO
Data: 19/08/2025 15:03:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBN
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M313o Marçal, Caroline Vieira.
ÓTIMIZAÇÃO DA PROPORÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS
PARA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND DE ALTO
FORNO INDUSTRIALIZADO NO OESTE MARANHENSE /
Caroline Vieira Marçal. — 2025.
106 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo
Coorientador(a): Prof. Dr. Rodrigo Rodrigues da Cunha
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Belém, 2025.

1. Escória de Alto-Forno. 2. Clínquer. 3. Cimento
Portland. 4. Materiais cimentícios suplementares. I. Título.

CDD 624

*Dedico esta dissertação aos meus pais,
João Marçal (in memoriam) e Fátima Marçal,
pelo amor, incentivo e apoio em todos os momentos desta caminhada.*

Agradecimentos

Ao chegar o momento dos agradecimentos, é natural o receio de esquecer alguém que, de alguma forma, contribuiu para a realização desta pesquisa. Por isso, antes de citar nomes, registro minha gratidão a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para que este trabalho fosse possível. Em especial, agradeço à minha família, às pessoas que estiveram mais próximas ao longo deste percurso e às instituições e empresas que apoiaram e viabilizaram a concretização deste estudo. A todos, meu sincero reconhecimento.

A Deus, que me ajudou a superar as inúmeras dificuldades e a desistência durante esta jornada desafiadora do mestrado.

Ao meu pai, in memoriam, por me encorajar a realizar os meus sonhos e por investir na minha carreira e em meus estudos, desde o ensino básico até o meu maior presente: a faculdade privada, paga com seus recursos. Seu último pedido em vida foi realizado: me tornei Mestre.

À minha mãe, por todo o carinho, incentivo e colo. Nos momentos mais difíceis, eu sempre sabia que tinha um café e muito amor para receber da senhora.

Ao professor e amigo Dr. Rodrigo Rodrigues da Cunha, pelo incentivo, paciência e imensurável conhecimento transmitido. Pela condução nos momentos mais difíceis.

Ao orientador, Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macedo, por ter me aceitado como orientanda, pela condução nesta jornada e pelos conhecimentos transmitidos.

À empresa TotalMIX Controle, agradeço ao Eng. José Luiz Soares por abrir as portas da empresa. Agradeço aos funcionários João Vitor Barbosa, Ana Beatriz Ramos, Denis Fabrício, Joelson Mendes, Lucas e Reinaldo pelo apoio nos ensaios e na pesquisa.

Ao Instituto Federal do Pará (IFPA) – Campus Belém, por ceder a estrutura de laboratório para a realização de diversos ensaios que contribuíram para esta pesquisa

À Prof^a Dr^a Joana Zandonadi, que colaborou nos ensaios realizados na Unifesspa, campus Marabá, e pela amizade e parceria durante o período de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Sabino Aguiar, por realizar ensaios na Unifesspa que foram fundamentais nesta pesquisa.

À Ma. Wambia Faria, pelo apoio nos ensaios de DRX e FRX dos protótipos no CTRI/UFG.

Aos professores Dr. Marcelo Picanço e Dr. Mateus Oliveira, pelas colaborações e sugestões feitas nesta pesquisa.

Aos amigos que conquistei durante a jornada: Joana Zandonadi, Erick Machado, Kleber Mattos, Nilton César, Ricardo Borges, Juliane Barbosa e Matheus Corrêa.

À minha amiga Helem Moura, por todo o apoio dado à nossa família nos momentos mais difíceis que vivemos.

À família Vieira, pelo amor, carinho e apoio sempre ofertados.

À família Marçal, pelo amor, carinho e apoio sempre ofertados.

À empresa Cimento Verde do Brasil, fábrica localizada em Açailândia – MA, por ceder materiais importantes para este estudo.

À Fábrica de Cimento ELO, em Currais Novos, pelo apoio e colaboração com ensaios importantes para a realização desta pesquisa.

À Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa), pela parceria nos ensaios e pela contribuição para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Universidade Federal de Goiás (UFG), em especial ao Centro de Tecnologia em Resíduos e Sustentabilidade (CTRI), pelo apoio técnico e científico.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), por disponibilizar estrutura do laboratório para realização de ensaio.

*“A humildade é a base e o fundamento de todas as virtudes
e sem ela não há virtude que o seja”
(Irmã Dulce)*

RESUMO

MARÇAL, C. V. Otimização da Proporção de Matérias-Primas para Produção de Cimento Portland de Alto Forno Industrializado no Oeste Maranhense. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2025.

A construção civil é um setor de grande relevância para o desenvolvimento econômico do país, mas também apresenta um consumo significativo de matérias-primas naturais e é responsável pela maior parte do consumo de cimento produzido globalmente. A fabricação deste material gera impactos ambientais, principalmente devido à etapa de sinterização do clínquer (o principal constituinte do cimento), que resulta na emissão de grandes quantidades de CO₂ para a atmosfera. Por essa razão, diversos estudos têm sido conduzidos para identificar materiais alternativos que possam servir como adições minerais ao cimento, substituindo parcialmente o clínquer. Grande parte dessas pesquisas explora o uso de adições provenientes de resíduos industriais. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo otimizar a proporção de matérias-primas para a produção de Cimento Portland de Alto-Forno (CP III-E 32) em uma indústria localizada no Oeste Maranhense. O foco é a substituição parcial do clínquer pela escória granulada de alto-forno (EAF), um material que contribui para a redução das emissões de CO₂ na indústria cimenteira. Para tanto, o estudo foi dividido em duas fases. Inicialmente, foi realizada a caracterização detalhada da escória de alto-forno, por meio de ensaios físicos, químicos, mineralógicos e ambientais, para verificar sua viabilidade técnica conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018). Em seguida, foram formulados quatro protótipos de cimento CP III-E 32 com variações na composição, reduzindo-se o teor de clínquer e aumentando o teor de EAF: de 55% Clínquer/45% EAF (AM01) até 25% Clínquer/75% EAF (AM04). O desempenho pozolânico dessas novas composições foi avaliado em comparação com o padrão industrial (65% Clínquer/35% EAF). Os resultados demonstraram que as formulações que utilizaram teores de 45% Clínquer/55% EAF (AM02) e 55% Clínquer/45% EAF (AM01) apresentaram um desempenho químico-mecânico satisfatório. A utilização da escória de alto-forno em maior proporção comprova a viabilidade técnica para a produção de cimento CP III-E 32 no Oeste Maranhense, promovendo a redução do consumo de clínquer e minimizando os impactos ambientais no processo produtivo da construção civil.

Palavras-chave: Escória; Materiais; Clínquer; Cimento.

ABSTRACT

MARÇAL, C. V. Otimização da Proporção de Matérias-Primas para Produção de Cimento Portland de Alto Forno Industrializado no Oeste Maranhense. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2025.

The civil construction sector is of great relevance to the country's economic development, but it also features a significant consumption of natural raw materials and is responsible for the majority of cement consumed globally. The manufacturing of this material generates environmental impacts, mainly due to the clinker sintering stage (the main constituent of cement), which results in the emission of large quantities of CO_2 into the atmosphere. For this reason, various studies have been conducted to identify alternative materials that can serve as mineral additions to cement, partially replacing clinker. Much of this research explores the use of additions derived from industrial waste. In this context, the present work aims to optimize the proportion of raw materials for the production of Blast-Furnace Portland Cement (CP III-E 32) in an industry located in the West Maranhão region. The focus is on the partial substitution of clinker with granulated blast-furnace slag (GBFS), a material that contributes to the reduction of CO_2 emissions in the cement industry. For this purpose, the study was divided into two phases. Initially, a detailed characterization of the blast-furnace slag was performed, using physical, chemical, mineralogical, and environmental tests, to verify its technical feasibility according to NBR 16697 (ABNT, 2018). Subsequently, four prototypes of CP III-E 32 cement were formulated with variations in composition, reducing the clinker content and increasing the GBFS content: from 55% Clinker/45% GBFS (AM01) up to 25% Clinker/75% GBFS (AM04). The pozzolanic performance of these new compositions was evaluated in comparison with the industrial standard (65% Clinker/35% GBFS). The results demonstrated that the formulations using 45% Clinker/55% GBFS (AM02) and 55% Clinker/45% GBFS (AM01) contents showed satisfactory chemical-mechanical performance. The use of blast-furnace slag in greater proportion confirms the technical viability for the production of CP III-E 32 cement in the West Maranhão region, promoting the reduction of clinker consumption and minimizing environmental impacts in the construction industry's production process.

Keywords: Slag; Materials; Clinker; Cement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.3 - Estrutura da dissertação	31
Figura 2.1.2 - Fluxograma fabricação do Cimento Portland via seca	33
Figura 3.3.A - Escória de alto-forno in natura.....	45
Figura 3.3.B - Escória de alto-forno beneficiada.....	45
Figura 3.3.C - Equipamento moinho de bolas pertencente ao laboratório LEMAC/UFPA	46
Figura 3.3.2.3.A - Avaliação de atividade pozolânica com Cal	49
Figura 3.3.2.3.B - Avaliação de atividade pozolânica com cimento	50
Figura 3.3.2.4 - Caracterização mineralógica, ensaio DRX, EAF beneficiada	51
Figura 3.3.2.5.A - Ensaio ambiental extrato lixiviado em uma amostra de EAF beneficiada	52
Figura 4.3.1.D - Resultado do ensaio de determinação do calor de hidratação para os protótipos	69
Figura 4.3.3 - Gráfico do ensaio de resistência a compressão axial	70
Figura 4.3.4 - Gráfico do ensaio de RAA.....	71
Figura 4.3.5.A - Gráfico contendo resultados dos ensaios de capilaridade dos protótipos .	73
Figura 4.3.5.B - Gráfico contendo resultados de ensaios de absorção de água por imersão e índice de vazios	74
Figura 4.3.6 - Gráficos dos ensaios de FRX referentes aos protótipos de cimento	75
Figura 4.3.7 - Resultados dos ensaios de MEV e EDS dos protótipos.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.5.A - Componentes do Cimento Portland de Alto-Forno	34
Tabela 2.1.5.B - Normas que se tornaram obsoletas com a publicação da NBR 16697 em 2018	35
Tabela 2.2.3.A - Métodos utilizados para caracterizar Escória de Alto-Forno	38
Tabela 2.2.3.B - Composição química de Escórias, comparativo entre parâmetros usados por ALVES, 2024 e pela autora	39
Tabela 3.2.2.A - Normas utilizadas nos ensaios de caracterização da EAF “in natura”	43
Tabela 3.2.2.B - Normas utilizadas nos ensaios de caracterização da EAF após moagem.	44
Tabela 3.3.1.1 - Ensaio para composição granulométrica da EAF “in natura”	47
Tabela 4.2.1.A - Limites normativos estabelecidos pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018) para fabricação de cimentos de alto-forno	58
Tabela 4.2.1.B - Nomenclatura e percentuais das matérias-primas componentes dos protótipos	59
Tabela 4.2.2.A - Normas para caracterização física e química dos materiais gipsita e clínquer	60
Tabela 4.2.2.B - Normas para caracterização dos protótipos de cimento Portland	61
Tabela 4.3.1 - Resultados dos ensaios de índice de consistência e tempo de pega	66
Tabela 4.3.2.A - Resultados dos ensaios de massa específica e granulometria	67
Tabela 4.3.2.B - Resultados dos ensaios de composição química obtidos por FRX.....	68
Tabela 4.3.2.C - Resultados dos ensaios de resíduos insolúveis	69
Tabela 4.3.3 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial	70
Tabela 4.3.4 - Resultados do ensaio de expansão de barras de argamassa (RAA)	71
Tabela 4.3.5.A - Resultados de ensaios de absorção de água por capilaridade.....	73
Tabela 4.3.5.B - Resultados de ensaios de absorção de água por imersão e índice de vazios	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Símbolo	Significado
a/c	Relação água/cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
AM01	Amostra 01 com 45% de escória
AM02	Amostra 02 com 55% de escória
AM03	Amostra 03 com 65% de escória
AM04	Amostra 04 com 75% de escória
ASTM	American Society for Testing and Materials
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
Cal	Calcita
CaO	Óxido de cálcio
CaSO ₄ ·2H ₂ O	Sulfato de cálcio di-hidratado (gesso)
COVID-19	Doença causada pelo coronavírus SARS-CoV-2, identificada em 2019
CO ₂	Dióxido de carbono
CP's	Corpos-de-prova
CP I	Cimento Portland Comum
CPII	Cimento Portland Composto
CPII-E	Cimento Portland Composto com Escória
CPII-F	Cimento Portland Composto com Fíler Calcário
CPII-Z	Cimento Portland Composto com Pozolana
CP III	Cimento Portland de Alto-Forno
CP III-E	Cimento Portland de Alto-Forno com escória granulada
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
CP V	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CSA	Cimento de Sulfoaluminato de Cálcio
CTRI	Centro de Tecnologia em Resíduos e Sustentabilidade
C ₂ S	Silicato dicálcico

C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
C ₄ AF	Ferrita tetracálcica
DRX	Difração de Raios X
EAF	Escória de Alto-Forno
EDS	Espectroscopia por Dispersão de Energia
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
FRX	Fluorescência de Raios X
IAP	Índice de Atividade Pozolânica
IFPA	Instituto Federal do Pará
LEC	Laboratório de Engenharia Civil (UFPA)
LEMAC	Laboratório Experimental de Materiais de Construção (UFPA)
MCM	Módulo de Controle de Mistura
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira (da ABNT)
NM	Norma Mercosul
R.I.	Resíduo Insolúvel
RAA	Reação Álcali-Agregado
REF	Protótipo de referência com 35% de EAF
SiO ₂	Dióxido de Silício
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
UFG	Universidade Federal de Goiás
UFPA	Universidade Federal do Pará
UNIFESSPA	Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.2.1 Objetivo Geral	20
1.2.2 Objetivos Específicos	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 CIMENTO.....	22
2.1.1 Histórico do Cimento Portland	22
2.1.2 Fabricação do Cimento Portland	24
2.1.2.1 Escória de Alto Forno.....	27
2.1.3 Composição química do Cimento Portland	28
2.1.3.1 Reação de formação do Clínquer.....	30
2.1.3.2 Módulo de controle de mistura.....	32
2.1.4 Hidratação do Cimento	33
2.1.5 Tipos de Cimento Portland.....	34
2.1.6 Cimento Portland de Alto Forno (CP III)	37
2.1.7 Tempo de pega.....	38
2.2 SUBPRODUTO: ESCÓRIA DE ALTO FORNO.....	39
2.2.1 Localização e distribuição da Escória de Alto Forno no Brasil	41
2.2.2 Produção da Escória de Alto Forno no estado do Maranhão	44
2.2.3 Características físicas e químicas da Escória de Alto Forno	46
2.3 CONCLUSÃO.....	48
3. CARACTERIZAÇÃO DO SUBPRODUTO ESCÓRIA DE ALTO FORNO, ANTES DA SUA APLICAÇÃO NA FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO.....	49
3.1 LOCALIZAÇÃO DO SUBPRODUTO ESCÓRIA DE ALTO FORNO.....	50
3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
3.3.1 Caracterização da EAF “in natura”	58

3.3.2 Caracterização da EAF beneficiada.....	63
3.4 CONCLUSÕES	71
3.5 REFERÊNCIAS	73
4. MELHORIA DA MISTURA DE MATÉRIAS-PRIMAS PARA FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO, NA REGIÃO OESTE DO MARANHÃO.....	77
4.1 INTRODUÇÃO	78
4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS.....	79
4.2.1 Materiais	79
4.2.2 Métodos	81
4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS	83
4.3.1 Caracterização física.....	83
4.3.2 Caracterização química.....	87
4.3.3 Resistência a compressão axial.....	90
4.3.4 Avaliação da reação álcali agregado	91
4.3.5 Avaliação de absorção de água.....	93
4.3.6 Análise mineralógica	95
4.3.7 Análise microestrutural (MEV)	97
4.4 CONCLUSÕES	99
4.5 REFERÊNCIAS	103
5. CONCLUSÕES GERAIS.....	105
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil constitui um pilar estratégico para a economia global, atuando como motor de crescimento ao mobilizar cadeias produtivas complexas e gerar empregos em larga escala. No Brasil, o setor responde por cerca de 6% do PIB nacional (CBIC, 2024) e se destaca como um dos maiores empregadores formais, com mais de 2,9 milhões de trabalhadores registrados. No estado do Pará, a construção civil desempenha um papel vital no desenvolvimento regional, impulsionando desde grandes projetos de infraestrutura até o mercado imobiliário local. Além de fortalecer a economia por meio de investimentos diretos, a indústria estimula setores correlatos, como o de materiais de construção e serviços especializados, consolidando-se como um dos principais vetores de desenvolvimento socioeconômico em todas as esferas (SINDUSCON-PA, 2025).

A trajetória do cimento no Brasil remonta ao século XIX, quando as primeiras iniciativas de produção nacional emergiram como resposta à dependência de importações europeias. A fundação da Companhia Brasileira de Cimento Portland, em 1926, marcou um ponto de inflexão: naquele ano, a produção saltou de 13 mil para 54 mil toneladas, inaugurando uma nova fase de consolidação industrial (SNIC, 2016). Desde então, o setor tem desempenhado um papel estratégico no processo de urbanização e industrialização do país, participando ativamente de empreendimentos emblemáticos como a construção de pontes e hidrelétricas.

No entanto, apesar de seu papel fundamental no progresso socioeconômico, a construção civil enfrenta desafios críticos relacionados ao uso insustentável de recursos naturais e aos impactos ambientais decorrentes de suas atividades. Segundo Roque (2019), o setor consome aproximadamente 40% da produção global de energia, 12-16% da água disponível e é responsável por 35% das emissões de CO₂, com destaque para a produção de cimento Portland, que contribui com cerca de 7% das emissões antropogênicas globais (SCRIVENER; SNELLINGS, 2022).

Dentre as estratégias promissoras para mitigar os impactos ambientais da construção civil, destaca-se a incorporação de resíduos industriais na produção de cimentos, abordagem que se alinha tanto com as metas do Acordo de Paris quanto com os princípios da economia circular. Nesse contexto, a escória de alto-forno, subproduto da siderurgia, emerge como alternativa tecnicamente viável e ambientalmente adequada. Suas propriedades permitem substituições parciais ao clínquer, que reduzem tanto as emissões quanto os custos de produção, além de proporcionar destinação adequada a um resíduo que, de outra forma, seria descartado (PAGIO et al., 2022; RODRIGUES et al., 2022).

No cenário atual, conforme dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2023), o consumo de cimento no Brasil atingiu 62,2 milhões de toneladas em 2022. Vale destacar que a indústria brasileira apresenta desempenho ambiental superior à média global, com emissões específicas de 580 kg de CO₂ por tonelada de cimento produzido, contra 608 kg/t no cenário internacional. Esse resultado decorre, em grande medida, da substituição progressiva do clínquer por materiais suplementares, como escórias, cinzas volantes e argilas calcinadas, além da adoção de coprocessamento de resíduos, que já responde por 30% da matriz energética do setor e evita a emissão anual de aproximadamente 2,9 milhões de toneladas de CO₂ (PAGIO et al., 2022).

A reutilização da escória de alto-forno na produção de cimentos Portland, como o CP-III-32, apresenta-se como solução duplamente vantajosa: reduz a extração de recursos naturais não renováveis e minimiza passivos ambientais industriais (OLIVEIRA et al., 2022). Estudos indicam que a substituição de 40% a 70% do clínquer por escória pode reduzir em até 40% as emissões de CO₂ associadas ao processo produtivo (PEREIRA et al., 2020), uma vez que diminui proporcionalmente a necessidade calcinação do calcário – etapa responsável por cerca de 60% das emissões totais. Adicionalmente, a estrutura vítreia da escória confere ao cimento CP-III-32 propriedades positivas quanto à resistência a sulfatos e menor permeabilidade, características particularmente relevantes para aplicações em ambientes agressivos (PICANÇO, 2011).

No contexto industrial regional, a empresa fornecedora dos materiais utilizados nesta pesquisa já opera com a produção dos cimentos CP IV e CP II-E, ambos formulados com a utilização de materiais suplementares ao clínquer. Diante dessa realidade produtiva e da disponibilidade contínua de escória granulada de alto-forno, torna-se pertinente avaliar a possibilidade de fabricação do cimento CP III na mesma planta. Essa análise contribui para verificar a adequação técnica do processo industrial existente e a viabilidade de ampliar o portfólio de cimentos a partir dos recursos já empregados pela indústria.

Diante desse contexto, esta pesquisa tem como objetivo central avaliar a viabilidade técnica e ambiental relacionada à substituição parcial de clínquer por escória granulada de alto-forno na produção do cimento Portland de alto-forno CP-III-32. Adotar-se-ão teores de escória que atingem o limite estabelecido pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Os resultados esperados visam contribuir para o avanço do conhecimento científico sobre cimentos sustentáveis, além de subsidiar práticas industriais mais eficientes e menos impactantes ao meio ambiente.

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

A pesquisa sobre a otimização da proporção de matérias-primas para a produção de cimento Portland de alto-forno, especialmente no contexto do Oeste Maranhense, é de suma importância devido aos impactos ambientais e econômicos da indústria cimenteira. A fabricação de cimento envolve a produção de clínquer, que demanda a exploração de recursos naturais e altas temperaturas, resultando em significativa emissão de CO₂ (ARRUDA, 2022). Estima-se que, para cada tonelada de clínquer produzida, cerca de 900 kg de CO₂ são liberados na atmosfera, impactando diretamente o meio ambiente (SCRIVENER, 2014 apud CUNHA, 2022). Diante dessa problemática, a pesquisa em torno da substituição parcial do clínquer por materiais alternativos, como a escória de alto-forno, surge como uma estratégia promissora para reduzir essas emissões e mitigar os impactos ambientais.

A escória de alto-forno, um subproduto da siderurgia, já tem sido amplamente utilizada na produção de cimentos compostos, devido à sua disponibilidade e viabilidade econômica (MARTINS et al., 2021). Além de contribuir para a redução das emissões de gases poluentes, a utilização desse material também melhora algumas propriedades do cimento, como a resistência à compressão (FARIAS, 2023; NEHRING et al., 2021). Essa substituição não só reduz a quantidade de clínquer necessário, como também favorece um uso mais sustentável dos resíduos industriais, promovendo benefícios ambientais e socioeconômicos (FARIAS, 2023).

Nesse contexto, a pesquisa sobre diferentes proporções de matérias-primas, especialmente em regiões como o Oeste Maranhense, torna-se ainda mais relevante. A adaptação das formulações de cimento para as necessidades e características locais pode resultar em um produto mais eficiente e sustentável, atendendo às exigências da indústria e da legislação ambiental vigente. Além disso, o aumento do uso de adições minerais, como a escória de alto-forno, pode contribuir significativamente para a redução da dependência de matérias-primas virgens e minimizar os impactos causados pela extração e beneficiamento de minerais (SANTOS et al., 2024; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2024). Assim, a pesquisa em torno da otimização dessas proporções é fundamental para o desenvolvimento sustentável do setor cimenteiro.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é produzir e avaliar cimentos Portland de alto-forno com resistência mínima de 32 MPa, conforme a NBR 16697 (ABNT 2018), variando as proporções de clínquer e escória, visando avaliar o desempenho físico e químico das misturas em uma fábrica de cimento no Oeste Maranhense.

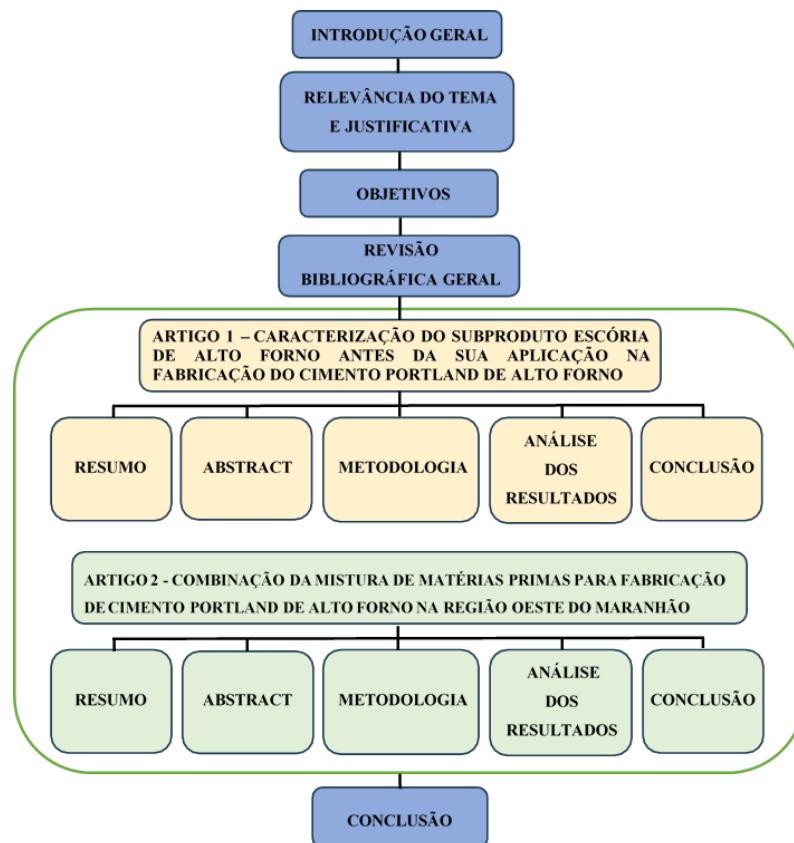
1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar a proporção ideal de substituição do clínquer por escória de alto-forno, visando a minimização das emissões de CO₂ e a eficiência energética no processo de fabricação.
- Estudar a viabilidade econômica da produção de cimento Portland de alto-forno em uma fábrica no Oeste Maranhense, considerando os custos de matérias-primas locais.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

O trabalho está estruturado em sete etapas distintas, cada uma contribuindo para o desenvolvimento abrangente da pesquisa. A Figura 1.3 ilustra o fluxograma que detalha a execução das fases sequenciais, proporcionando uma visão clara e organizada do processo investigativo.

Figura 1.3 - Estrutura da dissertação



Fonte: AUTORA, 2025

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CIMENTO

2.1.1 Histórico do Cimento Portland

O Cimento Portland é um material essencial na construção civil, caracterizado como um agente ligante hidráulico produzido a partir da moagem do clínquer — resultado da calcinação de calcário e argila — e da adição de sulfato de cálcio (gipsita) e outras adições minerais. Apresentando-se como um pó fino de coloração acinzentada, esse material possui propriedades coesivas e de endurecimento em contato com água, o que o torna fundamental para a produção de concreto e argamassas (BAUER, 2008; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O termo "Portland" foi estabelecido devido à semelhança entre a cor do cimento endurecido e a pedra calcária extraída na Ilha de Portland, na Inglaterra. Já a palavra "cimento" tem origem no latim caementum, utilizada pelos romanos para descrever pedras naturais não trabalhadas, evidenciando a longa história desse material, que remonta a cerca de 4.500 anos (BAUER, 2008). Os romanos foram pioneiros no uso de um concreto baseado em cimento hidráulico, que endurecia em contato com água, permitindo obras monumentais como o Panteão e o Coliseu (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Em 1756, o inglês John Smeaton produziu um ligante resistente ao calcinar calcários moles e argilosos, marcando um avanço significativo na busca por materiais de construção mais duráveis. Posteriormente, em 1818, o francês Louis Vicat desenvolveu misturas de calcário e argila, criando o primeiro cimento artificial e estabelecendo as bases científicas para a fabricação desse material. Em 1824, o inglês Joseph Aspdin patenteou o cimento Portland, nome inspirado na semelhança do material com as rochas da Ilha de Portland. Sua fórmula, baseada na mistura de calcário e argila calcinados, revolucionou a construção civil e se tornou padrão mundial (ABCP, 2016).

A história do cimento Portland no Brasil começou tardiamente em comparação à Europa, com as primeiras importações registradas em 1891, quando o material era trazido principalmente de indústrias europeias mais desenvolvidas (Santos et al., 2022). No entanto, foi apenas em 1892 que o engenheiro Louis Nóbrega produziu o cimento Portland pela primeira vez em solo brasileiro, ainda que de forma limitada e por um curto período (SNIC, 2016). A produção nacional em larga escala só ganhou impulso nas décadas de 1930 a 1950, impulsionada pela Segunda Guerra Mundial, que dificultou as importações e incentivou a industrialização local. Nesse período, o Brasil alcançou a autossuficiência, com a produção saltando de 13 mil toneladas em 1926 para impressionantes 3,2 milhões de toneladas em 1956 (SNIC, 2016).

A consolidação da indústria brasileira de cimento ocorreu com a fundação da Companhia Brasileira de Cimento Portland, que marcou o início da produção estruturada, reduzindo a dependência de importações e impulsionando a construção civil no país (Costa & Oliveira, 2021). A década de 1960 foi marcada pelo uso do cimento nacional em grandes obras de engenharia, como a Ponte Rio-Niterói, símbolo do avanço técnico brasileiro. Nas décadas seguintes, a expansão da malha rodoviária e a construção de hidrelétricas, como Itaipu e Tucuruí, consolidaram o cimento como um pilar do desenvolvimento infraestrutural (SNIC, 2016).

Atualmente, o setor mantém um desempenho robusto. Em fevereiro de 2025, as vendas de cimento no Brasil totalizaram 5,1 milhões de toneladas, registrando um crescimento de 7,5% em relação ao mesmo mês de 2024 (SNIC, 2025). No acumulado dos dois primeiros meses do ano, o setor apresentou alta de 6,4%, indicando uma recuperação consistente da demanda. Esse crescimento reflete a retomada de obras de infraestrutura e o aquecimento do mercado imobiliário.

A industrialização do cimento no Brasil passou por diversas fases de modernização tecnológica, com a implementação de processos mais eficientes e sustentáveis (Oliveira & Souza, 2023). No entanto, o setor enfrenta desafios ambientais, especialmente após o Acordo de Paris, que pressiona a redução das emissões de CO₂ – um problema crítico na produção

de cimento, devido à calcinação do calcário e ao alto consumo energético (Oliveira & Souza, 2023). Nos últimos anos, a indústria tem investido em alternativas como o uso de resíduos industriais na composição do cimento e a adoção de fontes de energia menos poluentes. Apesar disso, o cimento continua sendo um elemento fundamental no desenvolvimento da infraestrutura nacional, com perspectivas de crescimento sustentável nos próximos anos (Almeida & Rodrigues, 2023).

2.1.2 Fabricação do Cimento Portland

A produção do cimento Portland é resultado de um processo termoquímico controlado e depende de matérias-primas naturais, como calcário, argila e minério de ferro (componentes principais do Clínquer). De acordo com Neville e Brooks (2013), a mistura dessas matérias fornece os principais óxidos que irão compor os silicatos e aluminatos de cálcio (compostos responsáveis pelas propriedades aglomerantes do cimento).

Esta transformação ocorre através de uma série de etapas industriais, que podem ocorrer por via úmida ou via seca. Na presente pesquisa, adota-se o processo via seca, considerado mais eficiente do ponto de vista energético e ambiental. Conforme descrito pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento e Associação Brasileira de Cimento Portland o processo via seca é composto por sete etapas principais:

- Extração da Matéria-Prima

As principais matérias-primas são o calcário, fonte de carbonato de cálcio (CaCO_3), e a argila, rica em sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxidos de ferro (Fe_2O_3). Esses materiais são extraídos de jazidas naturais.

- Britagem

Após extraídas, as rochas são britadas e há redução de tamanho destas para seguir posteriormente com o processo de moagem.

- Moagem da Mistura Crua

Nesta etapa, os materiais britados são dosados e moídos até formarem uma farinha fina e seca (farinha crua). A moagem pode ocorrer em moinhos de bolas ou moinhos verticais de rolos, sendo controlada para garantir a granulometria ideal. Esta farinha apresenta uma composição química homogênea, necessária para reações eficazes no forno.

- Homogeneização da Mistura Crua

A farinha crua é armazenada em silos equipados com sistemas de aeração e mistura contínua. Isso assegura a homogeneidade química da mistura, condição essencial para a qualidade do clínquer produzido (NEVILLE; BROOKS, 2013).

- Calcinação (Formação do Clínquer)

A farinha homogênea é introduzida em um forno rotativo, aquecido a temperaturas de até 1450 °C. Durante a passagem pelo forno, ocorrem diversas reações físico-químicas, com destaque para a descarbonatação do calcário (liberação de CO₂) e a formação dos compostos de clínquer, como alita (C₃S) e belita (C₂S). A alta temperatura também confere ao clínquer sua forma nodular característica.

Segundo Cunha (2022), esta etapa é a maior responsável pela emissão de CO₂ do processo produtivo, respondendo por aproximadamente 50% do total emitido, sendo considerada o principal desafio ambiental da indústria do cimento.

No processo via seca, diferentemente do processo via úmida, a farinha é introduzida sem umidade, o que elimina a necessidade de energia para evaporação da água. Essa característica reduz o consumo térmico do processo e contribui para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa (BELIZÁRIO-SILVA, 2022).

- Moagem do Clínquer

Após ser resfriado rapidamente, o clínquer é misturado ao gesso (sulfato de cálcio), que regula o tempo de pega, e adições minerais como escória de alto-forno, fíler calcário ou materiais pozolânicos. Essa mistura é moída até atingir a finura necessária, originando o cimento Portland em sua forma final. A adição de resíduos com propriedades pozolânicas,

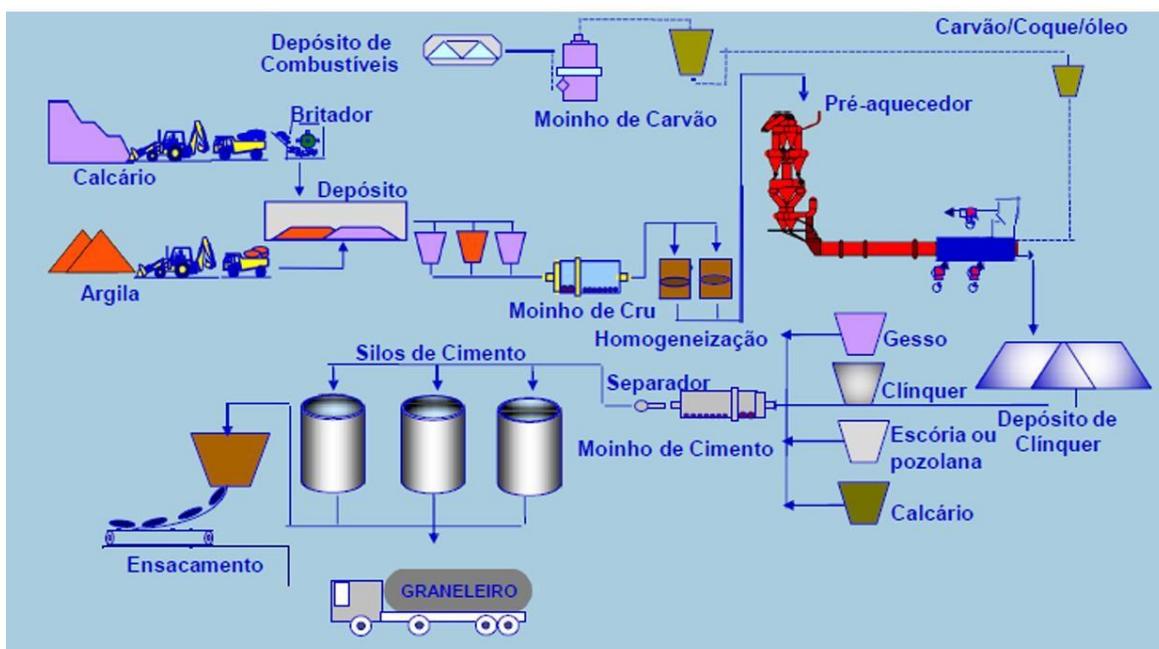
além de contribuir para o desempenho do cimento, é uma estratégia de sustentabilidade ambiental, promovendo o reaproveitamento de subprodutos industriais (CUNHA, 2022).

- Expedição do Cimento

O cimento é então armazenado em silos e posteriormente ensacado ou distribuído a granel. O transporte pode ocorrer por caminhões, trens ou embarcações, conforme a demanda do mercado.

A Figura 2.1.2 apresenta, em forma de fluxograma, as principais etapas do processo de fabricação do cimento Portland via seca, conforme descritas anteriormente. Essa representação esquemática contribui para uma visão integrada e didática da cadeia produtiva, em consonância com a abordagem metodológica sugerida pela ABCP (2002).

Figura 2.1.2 – Fluxograma fabricação do Cimento Portland via seca



Fonte: HONÓRIO,2018

2.1.2.1 Escória de Alto Forno

A escória de alto-forno é um subproduto gerado durante a produção de ferro-gusa, resultante da fusão das impurezas presentes no minério de ferro, combinadas com fundentes e cinzas do coque no alto-forno (Velten et al., 2006). Esse material, inicialmente considerado um resíduo industrial, é formado a partir da separação das impurezas do minério durante o processo de redução, emergindo como uma massa líquida que, dependendo do método de resfriamento, pode adquirir propriedades distintas (Barbosa, 2004). A escória é composta principalmente por silicatos e aluminatos de cálcio, sendo sua composição química e estrutura física determinadas pelas condições de resfriamento, o que influencia diretamente suas aplicações posteriores (Zou et al., 2024).

A classificação da escória de alto-forno como resíduo ou subproduto tem evoluído significativamente nas últimas décadas. Conforme destacado por Barbosa (2004), a denominação de "resíduo" só é adequada quando o material não possui uma aplicação definida. No entanto, com os avanços tecnológicos e a crescente conscientização ambiental, a escória passou a ser reconhecida como um coproducto valioso em países como Estados Unidos, Canadá e Alemanha, onde sua utilização contribui para a sustentabilidade e a economia circular (Zou et al., 2024). Essa mudança de paradigma reflete a importância de se valorizar os subprodutos industriais, transformando desafios ambientais em oportunidades econômicas.

Um dos usos mais consolidados da escória de alto-forno é na indústria da construção civil, especialmente na produção de cimento Portland. Quando resfriada rapidamente por meio de processos como a granulação, a escória adquire propriedades hidráulicas latentes, tornando-se um material ideal para a fabricação de cimentos compostos, como o CP III (Velten et al., 2006). A incorporação da escória no cimento não apenas melhora a resistência mecânica e a durabilidade do material, mas também reduz significativamente as emissões de CO₂ associadas à produção de clínquer, alinhando-se às demandas por práticas industriais mais sustentáveis (Zou et al., 2024). Além disso, a escória demonstra excelente desempenho em ambientes agressivos, como regiões marinhas ou expostas a sulfatos, devido à sua baixa permeabilidade e resistência química.

A geração de escória de alto-forno varia significativamente conforme a composição do minério de ferro e o processo metalúrgico utilizado. Segundo o Indian Bureau of Mines (2018), em minérios com teor de ferro entre 60% e 65%, a produção de escória oscila entre 300 e 540 kg por tonelada de ferro-gusa, podendo atingir até uma tonelada de escória por tonelada de produto em minérios de menor qualidade. Já na produção de aço, a proporção é menor, variando de 150 a 200 kg de escória por tonelada de aço líquido, representando cerca de 20% a 30% da massa total produzida. Essas variações destacam a importância da otimização dos processos siderúrgicos para reduzir a geração de resíduos e maximizar a eficiência dos recursos.

Além de sua relevância quantitativa, a escória de alto-forno tem um papel estratégico na promoção da sustentabilidade, especialmente na indústria da construção civil. Sua utilização como substituto parcial do clínquer Portland no cimento não apenas preserva recursos naturais, como calcário e argila, mas também reduz drasticamente as emissões de CO₂ associadas à produção cimenteira (Mancini et al., 2021). Essa substituição, que pode incluir outros materiais suplementares, como pozolanas e cinzas volantes, demonstra que a escória granulada moída é uma alternativa eficaz para manter as propriedades mecânicas e a durabilidade do cimento, alinhando-se às demandas por práticas industriais mais sustentáveis.

2.1.3 Composição química do Cimento Portland

O cimento Portland é amplamente utilizado na construção civil em todo o mundo, devido às suas propriedades de resistência, durabilidade e versatilidade. Sua eficácia está diretamente ligada à sua composição química, que é composta principalmente por quatro compostos essenciais: silicato tricálcico (C₃S), silicato dicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) e aluminoferrito tetracálcico (C₄AF). Cada um desses compostos desempenha um papel específico durante o processo de hidratação do cimento, influenciando suas propriedades finais, como resistência mecânica, tempo de pega e durabilidade (Mehta & Monteiro, 2014).

A produção do cimento envolve matérias-primas selecionadas, principalmente calcário, argila e gesso. O calcário é a principal fonte de cálcio, essencial para a formação dos silicatos de cálcio, que são os principais responsáveis pela resistência do cimento. A argila fornece sílica e alumina, cruciais para a formação dos aluminatos e ferritas, que afetam o tempo de pega e a durabilidade do material. O gesso, adicionado em pequenas quantidades, desempenha um papel crucial no controle do tempo de pega, evitando que o cimento endureça de forma demasiadamente rápida (Mehta & Monteiro, 2014).

A interação entre essas matérias-primas durante a fabricação do cimento é complexa, envolvendo reações químicas em alta temperatura. O calcário e a argila são calcinados em um forno rotativo a cerca de 1450°C, resultando na formação do clínquer, um produto intermediário que, quando moído com gesso, dá origem ao cimento Portland. A composição química precisa do cimento, definida pelas proporções dos quatro compostos principais, é fundamental para assegurar que o material atenda às exigências de resistência e durabilidade em aplicações práticas (Mehta & Monteiro, 2014).

Quando o cimento Portland é misturado com água, ocorrem reações químicas que transformam seus componentes secos em uma pasta sólida e rígida. Essas reações de hidratação podem ser divididas em diferentes etapas:

- Primeira Etapa - Molhamento e Dissolução: Nesta fase, o cimento é misturado com água, resultando na liberação de íons de cálcio, sílica, alumínio e ferro na solução aquosa. Esses íons tornam-se disponíveis para participar de reações químicas subsequentes.
- Segunda Etapa - Hidratação do Silicato Tricálcico (C_3S): Imediatamente após o contato do cimento com a água, o silicato tricálcico reage rapidamente, formando um gel de silicato de cálcio hidratado ($C-S-H$) e hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Esta reação é exotérmica e é responsável pela maior parte da resistência inicial do cimento (Mehta e Monteiro, 2014).

- Terceira Etapa - Hidratação do Aluminato Tricálcico (C_3A): O aluminato tricálcico também reage rapidamente em presença de água. No entanto, na presença de gesso (atuando como sulfato), forma-se a etringita, que ajuda a controlar o tempo de pega e contribui para a resistência inicial do concreto.
- Quarta Etapa - Formação de Produtos de Hidratação: À medida que a reação avança, os produtos de hidratação, como o gel de C-S-H, hidróxido de cálcio e etringita, começam a preencher os espaços vazios entre as partículas de cimento, resultando em um material final mais resistente.
- Quinta Etapa - Hidratação do Silicato Dicálcico (C_2S): O silicato dicálcico reage de forma mais lenta, mas também forma produtos hidratados, como o gel de C-S-H e hidróxido de cálcio, contribuindo para a resistência a longo prazo do concreto.
- Sexta Etapa - Hidratação do Ferroaluminato Tetracálcico (C_4AF): O ferroaluminato tetracálcico reage com a água de maneira semelhante ao aluminato tricálcico (C_3A), formando produtos hidratados como a etringita e outros compostos (Mehta e Monteiro, 2014). Embora não contribua significativamente para a resistência do concreto, auxilia no processo de endurecimento da matriz.
- Sétima Etapa - Endurecimento e Ganho de Resistência: Com o tempo, a quantidade de produtos hidratados aumenta e os poros diminuem, resultando em uma massa cada vez mais densa e resistente.

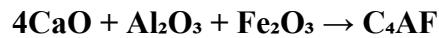
2.1.3.1 Reação de formação do Clínquer

A formação do clínquer é um processo fundamental na fabricação do cimento Portland, envolvendo uma série complexa de reações químicas e físicas. Este processo ocorre em fornos rotativos, onde uma mistura de calcário ($CaCO_3$) e argila é submetida a temperaturas elevadas, geralmente entre 1.450°C e 1.500°C. A calcinação, ou decomposição

térmica do calcário, é o primeiro estágio crítico, onde o carbonato de cálcio se decompõe em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO₂) (Scrivener, 1998).



Após a calcinação, o óxido de cálcio reage com os outros componentes presentes na mistura, como sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e óxidos de ferro (Fe₂O₃), para formar os principais compostos do clínquer: silicato tricálcico (C₃S), silicato dicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) e ferrita tetracálcica (C₄AF). Essas reações podem ser representadas de forma simplificada pelas seguintes equações:



Estudos microestruturais mostraram que a composição dos minerais formados pode variar significativamente de acordo com as condições de produção e com a presença de íons substituintes como Mg, Al e Fe nos cristais de alita e belita, o que influencia as propriedades finais do clínquer (Scrivener, 1998). Além disso, o comportamento de fases como a ferrita também é afetado por variações na composição química, podendo apresentar elevados teores de Mg e Al em substituição ao Fe, conforme observado em estudos de microanálise (Scrivener, 1998).

A formação desses compostos é crucial, pois eles determinam as propriedades finais do cimento, como resistência e tempo de pega. O clínquer resultante é um material nodular, que é posteriormente resfriado rapidamente para evitar a reversão das fases formadas e, em seguida, moído finamente junto com gesso (CaSO₄·2H₂O) para regular o tempo de pega do cimento. Recentemente, pesquisas têm explorado o desenvolvimento de clínqueres modificados, contendo fases como o ye'elimitre, que favorecem o ganho de resistência nas idades iniciais por meio da rápida formação de etringita (Ma et al., 2021). Embora o

ye'elimita seja mais comum em cimentos do tipo CSA, sua presença em baixos teores em clínqueres tipo Portland pode alterar a cinética de hidratação e a microestrutura da pasta endurecida, promovendo redução da microporosidade e aceleração da pega (Ma et al., 2021).

O processo de formação do clínquer é altamente endoenergético e requer um controle preciso das condições de operação do forno, incluindo temperatura, tempo de residência e composição da matéria-prima, para garantir a qualidade do produto final. Estudos sobre otimização de temperatura e controle de fases indicam que variações na química da matéria-prima podem afetar significativamente o desenvolvimento das fases silicatadas e aluminoferritas do clínquer (Scrivener, 1998; Ma et al., 2021). Além disso, a eficiência energética e a redução das emissões de CO₂ são aspectos críticos na operação dos fornos de clínquer, alinhados com as práticas de sustentabilidade ambiental (SNIC, 2024).

2.1.3.2 Módulo de controle de mistura

O módulo de controle de misturas (MCM) é um recurso empregado na fabricação de cimento Portland para permitir maior uniformidade na composição e nas características do produto final. O sistema utiliza tecnologias destinadas ao monitoramento e ao ajuste contínuo das matérias-primas e do clínquer ao longo do processo de produção.

O MCM opera com base em análises químicas e físicas realizadas continuamente nas matérias-primas, como calcário, argila, minério de ferro e demais aditivos. Essas análises, obtidas por espectrometria de fluorescência de raios X (XRF) e difração de raios X (DRX), fornecem dados sobre a composição elementar e mineralógica dos materiais. A partir dessas informações, o sistema ajusta automaticamente as proporções dos componentes para atender às especificações de óxidos principais: CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃.

O controle da mistura é necessário para a formação dos compostos do clínquer, como silicato tricálcico (C₃S), silicato dicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) e ferrita tetracálcica (C₄AF). A precisão na dosagem dos materiais representa um requisito técnico

para que o cimento apresente composição química adequada, o que influencia as propriedades mecânicas e de durabilidade do cimento Portland.

Além disso, o MCM permite a otimização do consumo de energia no forno rotativo. Ao proporcionar uma composição mais homogênea da mistura, o sistema reduz a necessidade de intervenções operacionais frequentes, favorecendo uma queima mais estável e com menor consumo de combustível. Essa condição também contribui para a redução das emissões de CO₂, em conformidade com práticas de maior eficiência ambiental.

O MCM ainda atua na gestão de materiais alternativos e resíduos industriais, como escórias de alto-forno e cinzas volantes, que podem ser incorporados à mistura de matérias-primas. A utilização desses materiais reduz custos produtivos e permite o aproveitamento de resíduos industriais, conforme indicado pelo SNIC (2024).

2.1.4 Hidratação do Cimento

A hidratação do cimento Portland é um processo complexo e essencial para o desenvolvimento das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. Este processo inicia-se com a mistura do cimento com a água, desencadeando uma série de reações químicas que transformam a pasta fluida em um material sólido e resistente. O tempo de pega inicial é um marco importante, definido pelo momento em que a pasta de cimento começa a perder sua plasticidade, caracterizado por um aumento súbito de viscosidade e elevação da temperatura. Esses fenômenos ocorrem devido às reações entre a água e os componentes do cimento, principalmente os silicatos e aluminatos, que formam uma matriz de produtos hidratados que gradualmente endurecem (Nodehi, 2021; Scrivener et al., 2019).

A proporção de água-cimento e a temperatura ambiente são fatores cruciais que influenciam o início da pega, com a viscosidade da pasta aumentando significativamente, sinalizando o início das reações de pega (Gencel et al., 2022; Wyrzykowski et al., 2019). Entre as reações mais importantes, destaca-se a hidratação dos silicatos de cálcio, que é fundamental para o desenvolvimento dos compostos responsáveis pela resistência e coesão

do cimento (Alt e Wong, 2023; Scrivener et al., 2019). A hidratação da alita (C_3S), por exemplo, ocorre com intensa liberação de calor e formação de C-S-H com morfologia em formato de agulhas durante o pico principal da hidratação (Scrivener et al., 2019).

A água desempenha um papel essencial nesse processo, pois a hidratação resulta na formação de uma microestrutura que influencia diretamente as propriedades mecânicas e a durabilidade do material (Shang et al., 2020). Além disso, estudos mostram que o avanço da hidratação ao longo do tempo modifica as características viscoelásticas da pasta de cimento, afetando, inclusive, o comportamento de deformação lenta, como o creep básico nas idades iniciais (Wyrzykowski et al., 2019).

Além disso, a hidratação dos aluminatos de cálcio é um fator determinante para o endurecimento rápido e a resistência inicial do cimento. A complexidade dessas reações envolve a formação de compostos intermediários, como a etringita, que contribuem para a estabilidade e coesão da matriz cimentícia (Sengupta et al., 2021; Scrivener et al., 2019). Com o início da pega, a viscosidade da pasta aumenta, resultando na perda de plasticidade ao longo do tempo até o endurecimento completo da mistura. Ao final do tempo de pega, a fase de endurecimento se inicia, aumentando a coesão e a resistência da pasta de cimento.

2.1.5 Tipos de Cimento Portland

Os tipos de cimento Portland disponíveis no Brasil são diversos e cada um possui características e aplicações específicas, definidas por suas composições e propriedades. Esses cimentos seguem normas da ABNT que regulam tanto a produção quanto o desempenho, assegurando a qualidade e adequação para diferentes tipos de obras na construção civil. As normas são fundamentais, pois estabelecem padrões técnicos para garantir a segurança e a durabilidade das construções NBR 16697 (ABNT 2018).

O Cimento Portland Comum (CPI) foi o primeiro tipo de cimento desenvolvido no Brasil e é amplamente utilizado em obras gerais de construção civil, como pavimentação, edificações e estruturas de concreto armado. Esse cimento é indicado para locais onde não

há exigências quanto à resistência a sulfatos ou à necessidade de hidratação lenta (MEHTA & MONTEIRO, 2008). Sua composição básica inclui clínquer e gesso, sendo o último utilizado como retardador de pega, o que torna esse tipo de cimento o mais simples e versátil em aplicações de construção.

Com o avanço da indústria e a busca por cimentos mais especializados, surgiu o Cimento Portland Composto (CPII), que é subdividido em três categorias principais: CPII-E, CPII-Z e CPII-F, cada uma com adições diferentes. O CPII-E, que contém escória de alto-forno, é utilizado em obras que exigem maior durabilidade, como fundações e pavimentações. O CPII-Z, que utiliza pozolana, é adequado para obras de infraestrutura que necessitam de maior resistência a ambientes agressivos, como barragens e obras expostas a águas agressivas. Já o CPII-F, com adição de filler calcário, é mais econômico e frequentemente aplicado em obras comuns de construção civil, como lajes, pisos e argamassas (ISAIA, 2005).

Outro tipo de cimento com grande relevância no mercado brasileiro é o Cimento Portland de Alto-Forno (CPIII). Esse cimento se destaca pela alta durabilidade e resistência a ambientes agressivos, como redes de esgoto e fundações de obras marítimas. Sua composição inclui uma alta proporção de escória granulada de alto-forno, o que o torna ideal para grandes volumes de concreto e obras que exigem uma hidratação mais lenta (MEHTA & MONTEIRO, 2008). A produção e qualidade desse tipo de cimento são regulamentadas pela NBR 16697 (ABNT 2018), que estabelece a proporção adequada entre clínquer, escória e material carbonático, conforme mostrado na Tabela 2.1.5.A a seguir.

Tabela 2.1.5.A – Componentes do Cimento Portland de Alto-Forno

Componentes (% em massa)				
Sigla	Classe de resistência	Clínquer + Sulfatos de Cálcio	Escória Granulada de Alto-Forno	Material Carbonático
CP III	25			
	32	65 - 25	35 - 70	0 - 5
	40			

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (ABNT 2018).

O Cimento Portland Pozolânico (CPIV) é caracterizado pela presença de adições pozolânicas, que conferem ao cimento baixa permeabilidade e alta durabilidade. Esse tipo de cimento é amplamente utilizado em obras que entram em contato com águas agressivas, como estações de tratamento de esgoto e barragens. A sua baixa permeabilidade o torna ideal para obras de grande volume de concreto, pois reduz a incidência de fissuras e aumenta a vida útil da estrutura NBR 16697 (ABNT 2018).

Outro tipo de cimento importante é o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV), que se destaca pela sua capacidade de desenvolver alta resistência em pouco tempo. Essa característica o torna adequado para obras que necessitam de desforma rápida, como na produção de pré-moldados e em reparos emergenciais. É amplamente utilizado em pavimentações e em estruturas que precisam ser concluídas em um curto período de tempo (ISAIA, 2005).

A NBR 16697, publicada em 2018, unificou oito normas do cimento Portland, modernizando requisitos técnicos, conforme mostrado na Tabela 2.1.5.B. A norma facilita a incorporação de adições, como escórias, promovendo cimentos com menor teor de clínquer, essenciais para a ecoeficiência do concreto. Além disso, garante a qualidade e consistência dos materiais, atendendo a demandas de mercado e incentivando a inovação tecnológica no setor da construção civil (GONÇALVES, 2021).

Tabela 2.1.5.B – Tabela contendo normas que se tornaram obsoletas com a publicação da NBR 16697 em 2018

Norma	Tipo de cimento	Ano de publicação
ABNT NBR 5732	Cimento Portland Comum - CPI e CPI-S	
ABNT NBR 11578	Cimento Portland Composto - CII	
ABNT NBR 5735	Cimento Portland de Alto Forno - CPIII	1991
ABNT NBR 5736	Cimento Portland Cimento Pozolânico - CPIV	
ABNT NBR 5733	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial - CPV ARI	
ABNT NBR 5737	Cimento Portland - Resistente a Sulfatos - RS	1992
ABNT NBR 13116	Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação - BC	1994
ABNT NBR 12989	Cimento Portland Branco - CPB	1993

Fonte: Adaptado de GONÇALVES, 2021

2.1.6 Cimento Portland de Alto Forno (CP III)

O Cimento Portland de Alto-Forno (CPIII) é amplamente utilizado na construção civil, especialmente em projetos de grande escala, devido às suas características únicas que o tornam adequado para estruturas que exigem controle térmico rigoroso e durabilidade a longo prazo. A composição básica do CPIII, conforme a NBR 5735, inclui clínquer, escória granulada de alto-forno, que varia de 35% a 70%, e pequenas quantidades de gesso, conforme visualizado anteriormente na Tabela 1. Essa composição é crucial para suas propriedades específicas NBR 16697 (ABNT 2018).

Uma das principais características do CPIII é o seu baixo calor de hidratação, o que significa que ele libera calor de forma lenta durante o processo de cura. Isso é particularmente vantajoso em grandes estruturas de concreto, como barragens e fundações, onde a geração excessiva de calor pode causar fissuras. A adição de escória granulada de alto-forno reduz a temperatura durante a hidratação, resultando em uma reação mais lenta e controlada (LU et al., 2023). Essa propriedade faz com que o CPIII seja ideal para projetos em climas quentes, minimizando a necessidade de resfriamento durante a cura do concreto, e para aplicações em ambientes agressivos que exigem grande durabilidade (IIETA, 2022).

O endurecimento lento do CPIII está diretamente relacionado à sua composição. A escória granulada de alto-forno é menos reativa que o clínquer, o que resulta em reações de hidratação mais lentas. Como resultado, há uma menor liberação de calor nas fases iniciais da cura, o que é benéfico para evitar fissuras causadas por picos de temperatura (John et al., 2021).

Em termos de resistência, o CPIII 32 apresenta uma resistência característica à compressão mínima de 32 MPa aos 28 dias. Os valores de resistência à compressão ao longo do tempo, em condições normais de cura, segundo a norma NBR16697 (ABNT 2018) são:

- Em 3 dias: Maior ou igual a 10 MPa
- Em 7 dias: Maior ou igual a 20 MPa

- Em 28 dias: Maior ou igual a 32 MPa

Embora o CPIII apresente um ganho de resistência mais lento no início, ele atinge patamares elevados no longo prazo, o que reforça sua adequação para projetos que demandam durabilidade. Estudos experimentais detalham o processo de endurecimento lento do CPIII, apresentando resistências obtidas em diferentes idades. Esses estudos corroboram a indicação do CPIII para projetos de grande escala, onde o controle térmico e a durabilidade a longo prazo são fundamentais (Pereira e Lima, 2022). Dessa forma, o CPIII se destaca como uma escolha favorável em contextos que exigem não apenas resistência, mas também um controle cuidadoso das condições térmicas durante o processo de cura.

2.1.7 Tempo de pega

O tempo de pega do cimento é um parâmetro crucial na construção civil, pois determina o intervalo necessário para que a pasta de cimento, após a mistura com água, transite do estado plástico para um estado rígido. Este parâmetro é essencial para assegurar o tempo apropriado de manuseio e aplicação do concreto ou argamassa, garantindo a qualidade e a segurança das estruturas construídas NBR 16697 (ABNT 2018).

O conceito de tempo de pega é dividido em dois momentos distintos: o início de pega e o fim de pega. O início de pega é o momento em que a pasta de cimento começa a perder sua plasticidade. Para o cimento Portland comum, este tempo geralmente varia entre 1 e 3 horas. Já o fim de pega é quando a pasta adquire rigidez suficiente, tornando-se sólida, ocorrendo geralmente entre 4 a 6 horas, embora possa variar conforme o tipo de cimento e as condições ambientais NBR 16697 (ABNT 2018).

O ensaio de Vicat, conforme descrito na norma NBR NM 65 (ABNT 2002), é um método padronizado utilizado para determinar os tempos de início e fim de pega do cimento. Este ensaio utiliza um aparelho específico que mede a profundidade de penetração de uma agulha na pasta de cimento, indicando a evolução da rigidez ao longo do tempo. O início de pega é definido como o tempo transcorrido desde a adição de água até o momento em que a

agulha de Vicat penetra na pasta até uma distância de (4 ± 1) mm da placa base. Já o fim de pega é o tempo até que a agulha penetre apenas 0,5 mm na pasta NBR NM 65 (ABNT 2002).

Para o Cimento Portland de Alto-Forno (CP III), o tempo de pega esperado é ligeiramente mais longo comparado ao cimento Portland comum. O início de pega para o CP III costuma ocorrer entre 1,5 e 4 horas, enquanto o fim de pega geralmente acontece entre 4 e 7 horas. Este prolongamento no tempo de pega é atribuído à presença de escória de alto-forno em sua composição, que pode chegar a até 70%, influenciando as propriedades de hidratação do cimento. Além disso, fatores como condições ambientais, a proporção água/cimento e o uso de aditivos podem também impactar o tempo de pega do CP III (Mehta e Monteiro, 2014).

2.2 SUBPRODUTO: ESCÓRIA DE ALTO FORNO

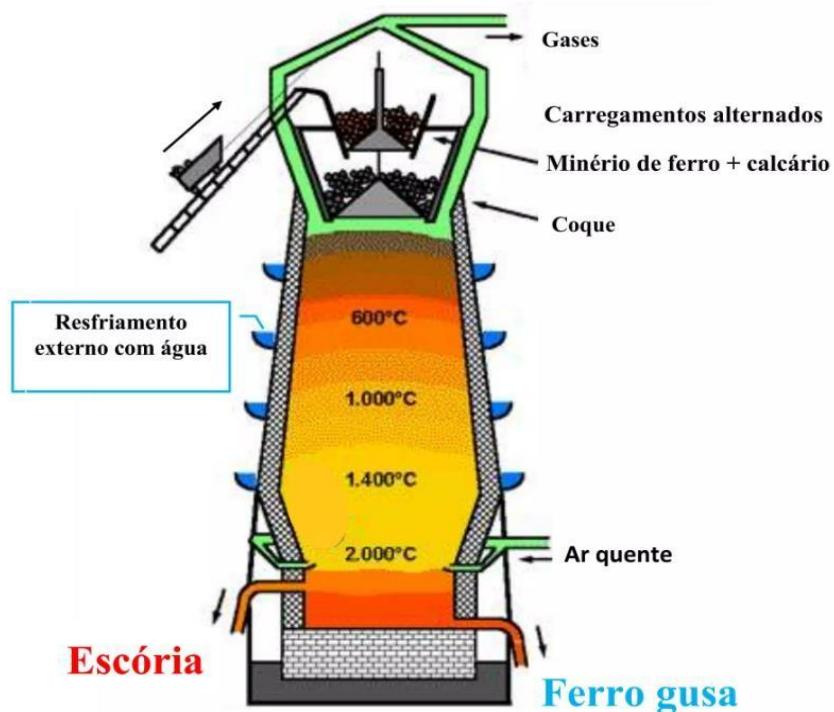
A escória de alto-forno é um subproduto significativo da indústria siderúrgica, resultante do processo de fusão do minério de ferro em altos-fornos. A quantidade de escória gerada durante a produção de ferro-gusa varia substancialmente, sendo influenciada pela composição das matérias-primas e pelo tipo de forno empregado. Em cargas de minério com teor de ferro entre 60% e 65%, a produção de escória de alto-forno oscila entre 300 a 540 kg por tonelada de ferro-gusa ou ferro bruto produzido. Quando o minério apresenta teor de ferro inferior, a geração de escória pode chegar a até uma tonelada por tonelada de ferro-gusa. Já na fabricação do aço, a geração de escória situa-se entre 150 a 200 kg por tonelada de aço líquido, representando de 20% a 30% da massa total do aço bruto produzido (INDIAN BUREAU OF MINES, 2018).

A escória de alto-forno oferece benefícios significativos quando utilizada na produção de cimentos e concretos, destacando-se nas esferas ambiental, econômica e de resistência. Ambientalmente, a incorporação da escória em cimentos binários e terciários reduz o consumo de energia e recursos naturais nos processos de clinquerização e moagem, além de diminuir as emissões de CO₂, promovendo a sustentabilidade ao evitar o descarte em aterros industriais (NEHRING et al., 2021). Economicamente, seu uso reduz os custos

de produção de cimento, concreto e argamassa, o que é particularmente relevante em países subdesenvolvidos com déficit habitacional, onde materiais de construção representam uma grande parte do custo das edificações (NEHRING et al., 2021).

O processo de produção nos altos-fornos, Figura 2.2, envolve a combinação de calcário, minério de ferro e coque, que, quando fundidos a uma temperatura de aproximadamente 1500°C, originam o ferro e a escória em estado líquido (Ahmad et al., 2022). A escória líquida pode ser resfriada de duas maneiras distintas, resultando em diferentes tipos de escória. Quando resfriada ao ar, forma a escória cristalizada, que não possui propriedades aglomerantes hidráulicas e é utilizada como material inerte em diversas aplicações (ArcelorMittal). Por outro lado, a escória granulada é obtida quando o resfriamento é feito rapidamente com jatos de água, resultando em uma substância vítreia e granular com grande potencial hidráulico, ideal para a fabricação de cimento e concreto (ArcelorMittal).

Figura 2.2 – Ilustração do processo de produção do ferro gusa, que da origem a escória de alto-forno como co-produto



Fonte: THOMAZ, 2014

A gestão da escória de alto-forno é um desafio ambiental e econômico para a indústria siderúrgica, uma vez que sua geração em grandes quantidades demanda soluções eficazes para seu aproveitamento e disposição (GALUPPO, 2020). Países como China e Japão lideram pesquisas sobre a reutilização da escória, buscando integrar esse resíduo em processos produtivos sustentáveis (GALUPPO, 2020). A escória granulada, em particular, tem encontrado um mercado crescente nas cimenteiras, devido à sua capacidade de endurecer em contato com a água, substituindo parcialmente o clínquer na produção de cimento, o que contribui para a redução das emissões de CO₂ associadas à indústria cimenteira (ArcelorMittal).

2.2.1 Localização e distribuição da Escória de Alto Forno no Brasil

A localização e distribuição da Escória de Alto-Forno no Brasil está diretamente relacionada à geografia da produção de ferro-gusa, uma vez que a escória é um subproduto desse processo industrial. O parque siderúrgico brasileiro é composto por 28 unidades produtoras de aço, distribuídas em diversas regiões do país, conforme ilustra a Figura 2.2.1.A. Essas unidades estão concentradas principalmente nas regiões Sudeste e Sul, onde se encontram os maiores polos industriais e siderúrgicos do Brasil.

Figura 2.2.1.A - Empresas Produtoras de Aço



Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL, 2023

A produção de escória de alto-forno segue uma relação direta com a produção de ferro-gusa, sendo influenciada principalmente pela composição das matérias-primas e pelas características operacionais dos fornos utilizados. Segundo o Indian Bureau of Mines (2018), para cargas de minério com teor de ferro entre 60% e 65%, são gerados entre 300 a 540 kg de escória para cada tonelada de ferro-gusa produzido. No caso de minérios com teor inferior de ferro, a geração de escória pode alcançar até uma tonelada por tonelada de ferro-gusa. Essa geração expressiva torna a escória de alto-forno uma consequência inevitável do processo siderúrgico, o que implica a necessidade de sua gestão adequada para minimizar impactos ambientais, como o aumento das emissões de gases nocivos. A produção de ferro-gusa no Brasil é significativa, com dados do Instituto Aço Brasil (2023) indicando uma produção de 26,813 milhões de toneladas em 2022, o que, considerando a faixa de geração de escória apontada, resulta em uma produção estimada entre 8,04 a 14,48 milhões de toneladas de escória de alto-forno no mesmo ano (INDIAN BUREAU OF MINES, 2018).

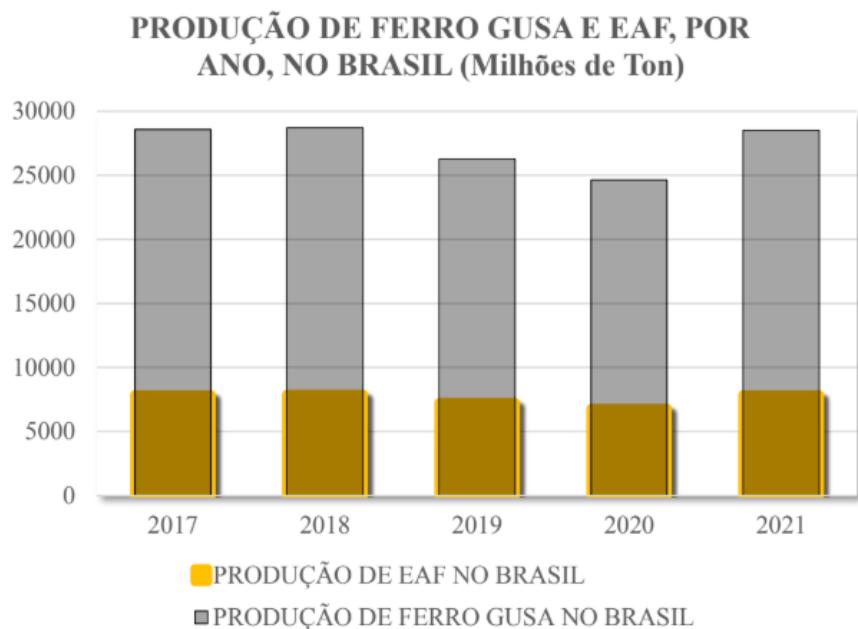
Os dados discutidos no parágrafo anterior estão apresentados de forma mais detalhada na Tabela 2.2.1. A análise desses dados foi realizada por meio da representação gráfica demonstrada na Figura 2.2.1.B. No eixo X, encontra-se o período de coleta dos dados, expresso em anos. No eixo Y, está representada a quantidade de produção, em uma escala de milhões de toneladas, resultando na formação de dois gráficos de barras: o primeiro, na cor cinza, refere-se à produção de ferro-gusa; enquanto o segundo, na cor amarela, corresponde à produção de escória de alto-forno (EAF). De acordo com os parâmetros estabelecidos por Piemonti et al. (2021), a produção de escória de alto-forno (EAF) no Brasil correspondeu a 27,5% da produção total de Ferro-Gusa.

Tabela 2.2.1 – Produção de Ferro-Gusa e EAF em milhões de toneladas a cada ano.

Produção por ano no Brasil (Milhões de Ton)						
Produto	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Ferro-Gusa	28.572,0	28.718,0	26.280,0	24.644,0	28.510,0	26.813,0
EAF (média)	7.857,3	7.897,5	7.227,0	6.777,1	7.840,3	7.373,6

Fonte: Adaptado de Aço Brasil Anuário 2023

Figura 2.2.1.B – Representação gráfica da produção de Ferro Gusa e EAF no Brasil no período de 2017 à 2022



Fonte: AUTOR, 2025

2.2.2 Produção da Escória de Alto Forno no estado do Maranhão

Conforme exposto na Figura 2.2.1, observa-se que, no estado do Maranhão, há apenas uma indústria em operação na produção de Ferro-Gusa, a Aço Verde do Brasil (AVB). De acordo com o Anuário 2023 do Instituto Aço Brasil, os dados referentes à produção de Ferro-Gusa no Maranhão estão apresentados na Tabela 2.2.2 a seguir. Nessa mesma tabela, são exibidos os dados relativos à geração de Escória de Alto-Forno (EAF). Os dados referentes a EAF foram calculados com base na literatura previamente mencionada, conforme Piemonti et al. (2021).

Tabela 2.2.2 – Produção de Ferro-Gusa e EAF no estado do Maranhão em milhões de toneladas no período de 2017 a 2022.

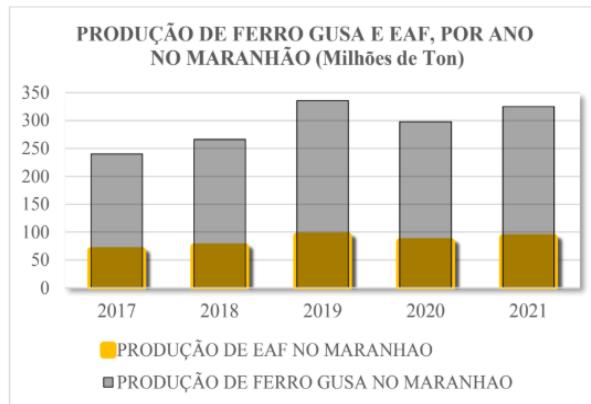
Produção por ano no estado do Maranhão (Milhões de Ton)						
Produto	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Ferro-Gusa	240,0	266,0	336,0	298,0	325,0	326,0
EAF (média)	66,0	73,2	92,4	82,0	89,4	89,7

Fonte: Adaptado de Aço Brasil Anuário 2023

Ao analisar graficamente esses dados (Figura 2.2.2), que são exclusivos do estado do Maranhão, observa-se um crescimento na produção durante o período de 2017 a 2019. Contudo, em 2020, em decorrência da pandemia de COVID-19, a indústria enfrentou um declínio produtivo em escala global, o que explica a baixa produtividade evidenciada no gráfico. O cenário mais recente, representado pelos dados de 2021 e 2022, indica uma retomada da produção, com uma importante tendência de crescimento.

Ainda referente ao gráfico contido na Figura 2.2.2, os dados contidos no eixo X, estão os anos, e representam o período estudado. No eixo Y, a produção é apresentada em milhões de toneladas, com dois gráficos de barras: o cinza representa a produção de Ferro-Gusa, e o amarelo, a produção de Escória de Alto-Forno (EAF).

Figura 2.2.2 – Produção de Ferro-Gusa em toneladas, no estado do Maranhão.



Fonte: AUTOR, 2025

2.2.3 Características físicas e químicas da Escória de Alto Forno

A reatividade da escória de alto-forno é amplamente investigada por meio de correlações entre sua composição química e outras propriedades, como a organização atômica, o estado vítreo, o índice de basicidade, a hidraulicidade e a resistência mecânica (ALVES, 2024). Esses fatores são fundamentais para determinar o comportamento da escória quando utilizada em matrizes cimentícias.

Para a obtenção das características físicas e químicas da escória de alto-forno, é necessário realizar ensaios padronizados, que são essenciais para a admissão do uso desse resíduo em materiais cimentícios. Esses ensaios, juntamente com os métodos utilizados, estão detalhados na Tabela 2.2.3.A a seguir.

Tabela 2.2.3.A – Métodos utilizados para caracterizar Escória de Alto-Forno

Métodos utilizados na caracterização da Escória de Alto-Forno		
Caracterização	Ensaio	Método
Física	Agregado graúdo Determinação da densidade - EAF "in natura"	NBR 16917 (ABNT,2021)
	Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica	NBR NM 23 (ABNT, 2000)
	Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de Blaine	NBR 16372 (ABNT,2015)
	Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm	NBR 11579 (ABNT, 2012)
	Granulometria a laser	Granulômetro a laser
Química	Cimento Portland e matérias primas - Espectrometria por fluorescência de raios X - FRX	NBR 14656 (ABNT, 2023)
	Hidraulicidade	NBR 16697 (ABNT, 2018)
Pozolanicidade	Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com CAL	NBR 5751 (ABNT, 2015)
	Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cimento	NBR 5752 (ABNT, 2014)
Mineralógica	Difração de raio X - DRX	Difratômetro
Ambiental	Lixiviação	NBR 10005 (ABNT,2004)
	Solubilidade	NBR 10006 (ABNT, 2004)
	Classificação	NBR 10004 (ABNT, 2004), Anexo F

Fonte: Autor, 2025

Após a realização dos ensaios listados na Tabela 2.2.3.A, deve-se observar alguns parâmetros, para avaliação dos resultados. Segundo ALVES, 2024, a Tabela 2.2.3.B apresenta a composição química de Escórias produzidas no Brasil, relacionando-as as composições e teores encontrados na literatura.

Tabela 2.2.3.B - Composição química de Escórias, comparativo entre parâmetros usados por ALVES, 2024 e pela autora

Composição química	Teores de Escória ALVES, 2024 (%)	Teores de Escória AUTOR, 2025 (%)
SiO ₂	30-35	40-41
Al ₂ O ₃	11-18	16-14
CaO	40-45	32-34
MgO	2,5-9	3-5
Índice de Hidraulicidade	1,93	1,28

Fonte: Adaptado de ALVES, 2024

A escória de alto-forno, subproduto da produção de Ferro-Gusa, é amplamente utilizada na fabricação de cimento, especialmente o cimento Portland de alto-forno, devido às suas características cimentícias e à sua contribuição para a sustentabilidade ambiental, ao reduzir a necessidade de extração de recursos naturais. No Brasil, o uso de escória na produção de cimento foi regulamentado em 1952, com o início da utilização de 30% de escória pela Cimento Tupi S.A., sendo que, em 1991, foi normatizada a produção do cimento Portland de alto-forno (VASCONCELOS, 2016).

A escória de alto-forno é classificada, de acordo com sua composição química, em ácida e básica. A escória ácida contém uma maior quantidade de óxido de silício (SiO₂) em relação ao óxido de cálcio (CaO), o que a torna menos reativa quando utilizada em misturas cimentícias. Seu uso é limitado a processos que requerem resistência à alcalinidade, mas suas aplicações na produção de cimento são mais restritas. Por outro lado, a escória básica, com maior concentração de óxido de cálcio, é mais reativa e amplamente utilizada na

fabricação de cimento Portland, especialmente o CP III, devido à sua capacidade de melhorar a resistência e durabilidade do cimento em ambientes agressivos (Ahmad et al., 2022).

A escória gerada no processo de produção de Ferro-Gusa pode ser resfriada de diferentes maneiras, o que influencia diretamente suas propriedades físicas e químicas. O resfriamento brusco com água resulta em uma estrutura amorfa (vítreo), conferindo à escória alta hidraulicidade, o que a torna adequada para uso na fabricação de cimento. Já o resfriamento lento, ao ar, leva à formação de estruturas cristalinas, reduzindo sua capacidade cimentante (ALVES, 2024).

A classificação da escória é feita com base na relação entre os óxidos de Cálcio, Magnésio e Alumínio em relação ao óxido de silício. De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), se o índice de hidraulicidade $(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2$ for maior que 1, a escória é classificada como básica e, portanto, adequada para utilização como adição em cimento Portland. Caso contrário, a escória é classificada como ácida, o que limita suas aplicações na indústria cimentícia (ALVES, 2024). No caso do presente estudo, a Escória utilizada pela autora é classificada como básica, conforme visualizado na Tabela 2.2.3.B, o índice de hidraulicidade é 1,28%

2.3 CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou informações detalhadas sobre o Cimento Portland, abordando seu histórico, processo de fabricação, composição, tipos de cimento e suas respectivas aplicações, além das normas vigentes no Brasil que regulamentam o uso do Cimento Portland. Também foram fornecidas informações acerca da Escória de Alto-Forno (EAF), incluindo a localização da indústria onde o material foi coletado, suas características, bem como uma breve discussão sobre a produção de EAF tanto no estado do Maranhão quanto no Brasil.

3. CARACTERIZAÇÃO DO SUBPRODUTO ESCÓRIA DE ALTO FORNO, ANTES DA SUA APLICAÇÃO NA FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO

RESUMO

A indústria do cimento é responsável por emissões significativas de gases que contribuem para o Efeito Estufa. O Brasil em 2022 emitiu cerca de 580 kg de CO₂ por tonelada de cimento produzida, valor à cima da média global (608 kg/t) (SNIC, 2023). Diante desse cenário, iniciativas como o Roadmap Net Zero buscam neutralizar as emissões do setor até 2050 (SNIC, 2023), reforçando a urgência de soluções sustentáveis. Uma alternativa promissora é a substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares, como a escória granulada de alto-forno. Este estudo visa caracterizar a escória fornecida por uma indústria de cimento localizada no oeste maranhense, avaliando sua viabilidade técnica para a produção de cimento Portland de alto-forno (CP III-E 32), conforme a norma NBR 16697 (ABNT, 2018). A escória analisada é um subproduto da produção de ferro-gusa em uma siderúrgica do Maranhão, região onde os resultados poderão ser aplicados em escala industrial. Ensaios físicos, químicos, mineralógicos e ambientais indicaram desempenho favorável da escória beneficiada em composições com clínquer e gipsita. A caracterização realizada oferece base científica para formulações de Cimento de Alto-Forno (CP-III) com menor teor de clínquer, ampliando a sustentabilidade do processo produtivo e reduzindo os impactos ambientais da construção civil.

Palavras-chave: Escória de Alto-Forno; Materiais Cimentícios Suplementares; Clínquer; Cimento Portland.

ABSTRACT

The cement industry is responsible for significant emissions of greenhouse gases. In 2022, Brazil emitted approximately 580 kg of CO₂ per ton of cement produced, a value above the global average (608 kg/t) (SNIC, 2023). Faced with this scenario, initiatives such as the Net Zero Roadmap aim to neutralize the sector's emissions by 2050 (SNIC, 2023), reinforcing the urgency for sustainable solutions. A promising alternative is the partial replacement of clinker with supplementary cementitious materials, such as granulated blast furnace slag. This study aims to characterize slag supplied by a cement industry located in western Maranhão, evaluating its technical feasibility for the production of Portland blast-furnace cement (CP III-E 32), according to the NBR 16697 standard (ABNT, 2018). The analyzed slag is a byproduct of pig iron production from a steel plant in Maranhão, where the results could be applied on an industrial scale. Physical, chemical, mineralogical, and environmental tests indicated favorable performance of the processed slag in compositions with clinker and gypsum. The characterization provides a scientific basis for formulations of Blast-Furnace Cement (CP-III) with reduced clinker content, enhancing the sustainability of the production process and reducing the environmental impacts of the construction industry.

Keywords: Blast Furnace Slag; Supplementary Cementitious Materials; Clinker; Portland Cement.

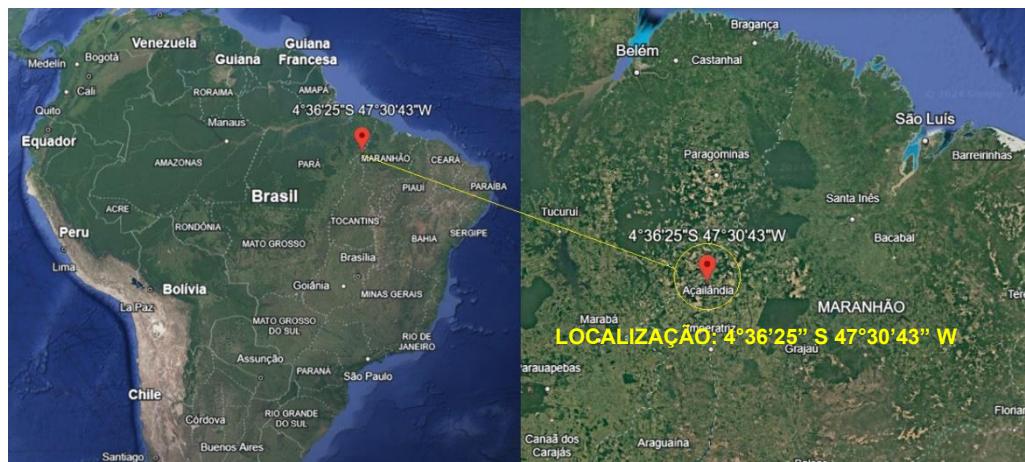
3.1 LOCALIZAÇÃO DO SUBPRODUTO ESCÓRIA DE ALTO FORNO

A Escória de Alto-Forno (EAF), subproduto da fabricação de ferro-gusa, é o foco deste estudo. Originada em uma indústria siderúrgica, localizada no município de Açailândia/MA, que integra um polo industrial em expansão, impulsionado pela mineração e pela produção de aço. Segundo Almeida Júnior et al. (2024), a mineração na região começou nos anos 1980, com cinco indústrias estimuladas pela extração de ferro na Serra de Carajás, a 371 km. A indústria estudada localiza-se em Açailândia/MA (Figura 3.1), a 4,3 km da BR-222, sendo essencial para a produção e o aproveitamento desse subproduto.

Consequentemente, Açailândia configura-se como um polo de integração modal interligando os modais ferroviário, rodoviário e portuário, e favorecendo o escoamento da produção industrial. Sua posição estratégica, a cerca de 560 km do Porto de Itaqui, um dos maiores do Brasil, assegura um fluxo eficiente para exportação e importação, consolidando sua relevância no cenário logístico nacional.

Quanto à malha rodoviária, Açailândia conta com duas importantes conexões. A BR-222 interliga o município ao oeste maranhense, conectando áreas estratégicas para o desenvolvimento regional. Paralelamente, a BR-010, conhecida como Rodovia Belém-Brasília, atravessa a cidade e facilita o transporte de cargas para diversas regiões do país.

Figura 3.1 – Mapa com a localização da coleta do subproduto Escória de Alto-Forno



Fonte: Adaptado de Google Earth, 2025

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Materiais

A escória de alto-forno (EAF) é um subproduto gerado durante a produção de ferro-gusa, em unidades siderúrgicas chamadas altos-fornos. O processo inicia com a alimentação do alto-forno com minério de ferro, coque e fundentes, como calcário e dolomita. O coque queima, atingindo temperaturas superiores a 1500°C, promovendo a fusão do minério e a separação das impurezas. As reações entre os fundentes e as impurezas resultam na formação da escória líquida, que flutua sobre o ferro-gusa devido à sua menor densidade (THOMAZ, 2012; PIMENTEL et al., 2017).

Após a separação, o ferro fluido é direcionado para moldes para a fabricação de aço, enquanto a escória é transferida para grandes recipientes e posteriormente despejada. O resfriamento da escória segue opções de técnicas distintas, que determinam suas propriedades. Se resfriada rapidamente com jatos de água, forma-se a escória granulada (Figura 3.2.A); se resfriada lentamente ao ar, obtém-se a escória cristalizada (THOMAZ, 2012).

Figura 3.2.A – Resfriamento de EAF com jatos de água sob alta pressão



Fonte: Adaptado de CVB, 2024; THOMAZ, 2012

Embora a composição química da EAF permaneça inalterada após o resfriamento, suas propriedades físicas e reatividade variam de acordo com o processo adotado. A escória

granulada, resfriada rapidamente, apresenta uma estrutura vítreia e amorfa, com alta reatividade, ao contrário da escória cristalizada. Devido a essas características, a escória granulada de alto-forno é amplamente reconhecida como um material adequado para a composição de cimentos. (DINA, 2014; ÖZBAY et al., 2016; Liu et al., 2024).

A composição química da EAF, embora sujeita a variações em função da matéria-prima empregada e das condições operacionais do alto-forno, é predominantemente constituída por óxido de cálcio, dióxido de silício, óxido de alumínio e óxido de magnésio (Gomes, Tavares e Correa, 2020). Ademais, essa escória pode ser classificada como ácida ou básica, a depender da relação entre os óxidos que a compõem. Para ser considerada ácida, a EAF deve apresentar uma predominância de óxido de sílica (SiO_2) em relação ao óxido de cálcio (CaO), o que resulta em uma capacidade de reatividade inferior em meio alcalino e, consequentemente, em uma aplicação restrita na produção de cimento. Em contraste, as EAF básicas, que exibem uma maior concentração de óxido de cálcio, demonstram elevada reatividade, o que as torna amplamente empregadas na indústria cimenteira (Ahmad et al., 2022).

Segundo o Indian Bureau of Mines (2018), a quantidade de escória gerada durante a produção de ferro-gusa e aço apresenta variações substanciais, sendo predominantemente influenciada pela composição das matérias-primas e pelo tipo de forno empregado. Habitualmente, em uma carga de minério com teor de ferro entre 60% e 65%, a produção de escória de alto-forno oscila entre 300 a 540 kg por tonelada de ferro-gusa ou ferro bruto produzido. No processo de fabricação do aço, a geração de escória é da ordem de 150 a 200 kg por tonelada de aço líquido. Para minérios de teor inferior de ferro, a quantidade de escória produzida pode ser consideravelmente maior, chegando até uma tonelada de escória por tonelada de ferro-gusa. Em termos proporcionais, a escória gerada na produção de aço representa cerca de 20% a 30% da massa do aço bruto produzido no país.

A Escória de Alto-Forno desempenha um papel fundamental na indústria da construção civil, sendo amplamente utilizada não apenas na produção de cimento, mas também como agregado para pavimentação e na composição do concreto. No setor cimenteiro, sua aplicação como substituto parcial do clínquer Portland é estratégica, pois,

além de preservar recursos naturais como calcário e argila, reduz significativamente as emissões de CO₂ associadas à fabricação do cimento, um dos maiores contribuintes para o impacto ambiental da construção civil. De acordo com Mancini et al. (2021), a substituição parcial do clínquer por materiais inorgânicos suplementares, como pozolanas, argilas calcinadas e subprodutos industriais, incluindo cinzas volantes e escória granulada de alto-forno moída, constitui uma abordagem eficiente para mitigar esses impactos ambientais, promovendo a sustentabilidade da indústria cimenteira sem comprometer o desempenho mecânico e a durabilidade do cimento Portland.

Para a realização deste estudo, foram utilizados os materiais apresentados seguir:

- Clínquer

O clínquer utilizado nesta pesquisa foi cedido por uma indústria cimenteira localizada na cidade de Açailândia, estado do Maranhão. O material foi disponibilizado especificamente para a realização do presente estudo.

- Gipsita

A gipsita (sulfato de cálcio hidratado) empregada neste trabalho também foi fornecida pela mesma indústria de cimento mencionada anteriormente, reafirmando a parceria técnico-científica estabelecida para esta investigação.

- Escória de alto-forno (EAF)

De forma semelhante aos materiais descritos acima (clínquer e gipsita), a escória de alto-forno (EAF) foi igualmente fornecida pela indústria cimenteira situada em Açailândia/MA. Ressalta-se que todos os materiais utilizados neste estudo são empregados rotineiramente pela referida empresa na produção de cimentos do tipo CP III.

Após a coleta dos materiais mencionados anteriormente, foi separada uma amostra de escória de alto-forno (EAF) “in natura”, destinada exclusivamente à realização dos ensaios de caracterização. O material remanescente (clínquer, gipsita e EAF) foi destinado ao processo de moagem no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará, campus Belém. Concluída a etapa de moagem, os materiais foram submetidos à etapa de peneiramento, utilizando-se peneira de malha 200.

3.2.2 Métodos

Para a caracterização da escória de alto-forno (EAF) utilizada nesta pesquisa, foram realizados ensaios em duas condições da amostra: na forma “in natura” (ou seja, tal como foi coletada diretamente da fábrica), e na amostra de EAF beneficiada pela autora no laboratório da UFPA. Os ensaios referentes à EAF “in natura” seguiram as normas indicadas na Tabela 3.2.2.A. Já os ensaios realizados após o processo de moagem e peneiramento da escória obedeceram às normas apresentadas na Tabela 3.2.2.B.

Tabela 3.2.2.A – Normas utilizadas nos ensaios de caracterização da EAF “in natura”

Normas para caracterização da Escória de Alto-Forno ("in natura")		
Caracterização	Ensaio	Método
Física	Composição granulométrica	NBR 17054(ABNT,2022)
	Determinação da massa específica	NBR 16917 (ABNT,2021)
Avaliação de atividade pozolânica	Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cimento	NBR 5752 (ABNT, 2014)
	Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com CAL	NBR 5751 (ABNT, 2015)

Fonte: Autora, 2025

Tabela 3.2.2.B- Normas utilizadas nos ensaios de caracterização da EAF após moagem

Normas para caracterização da Escória De Alto-Forno (Beneficiada)		
Caracterização	Ensaio	Método
Física	Determinação da finura pelo método de Blaine	NBR 16372 (ABNT,2015)
	Índice de consistência	NBR 13276 (ABNT 2016)
	Massa específica	NBR NM 23 (ABNT, 2000)
	Granulometria a laser	Procedimento
Química	Espectrometria por fluorescência de raios X - FRX	NBR 14656 (ABNT, 2023)
	Hidraulicidade	NBR 16697 (ABNT, 2018)
Avaliação de atividade pozolânica	Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com CAL	NBR 5751 (ABNT, 2015)
	Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cimento	NBR 5752 (ABNT, 2014)
Mineralógica	Difração de raio X - DRX	Procedimento
Ambiental	Lixiviação	NBR 10005 (ABNT,2004)
	Solubilidade	NBR 10006 (ABNT, 2004)
	Classificação	NBR 10004 (ABNT, 2004), Anexo F

Fonte: Autora, 2025

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

- Preparação das amostras

O processo de caracterização da escória de alto-forno (EAF) utilizada nesta pesquisa foi dividido em duas etapas. Inicialmente, foram separadas amostras para a realização de ensaios tanto com a escória "in natura" (Figura 3.3.A), quanto beneficiada (Figura 3.3.B). A EAF beneficiada corresponde a uma amostra que passou por um processamento em laboratório com o objetivo de adquirir as características necessárias para ser empregada como material cimentício suplementar, compondo o cimento CP III analisado neste estudo.

Figura 3.3.A – Escória de alto-forno in natura



Fonte: Autora, 2025

Figura 3.3.B – Escoria de alto-forno beneficiada



Fonte: Autora, 2025

O beneficiamento consistiu, primeiramente, na moagem a seco da escória, realizada no Laboratório Experimental de Materiais de Construção (LEMAC) da UFPA. Utilizou-se o equipamento moinho de bolas, com jarro e esferas de porcelana, marca EMIC, operando a 12 rpm, com capacidade de 7 litros (Figura 3.3.C). Após a moagem, o material apresentou aspecto pulverulento e foi encaminhado para a etapa seguinte de beneficiamento. Esta outra etapa também foi conduzida no LEMAC e consistiu no peneiramento do material moído, utilizando-se peneira 75 µm.

Figura 3.3.C – Equipamento moinho de bolas pertencente ao laboratório LEMAC/UFPA



Fonte: Autora, 2025

Além da EAF o clínquer e a gipsita, utilizados na formulação do referido cimento, também foram submetidos ao mesmo procedimento de beneficiamento. A rotação do equipamento permaneceu 12 rpm para todos os materiais. A carga moedora utilizada também permaneceu a mesma, que foi composta por 5 kg de bolas para cada 1 kg de material, e a proporção foi dividida em 2/3 de bolas pequenas e 1/3 de bolas grandes. (BARROS, 2025). Porém os tempos de moagem foram diferentes para cada material:

➤ Clínquer

Para a moagem do clínquer, estabeleceu-se o tempo de 03h00min. Esse tempo foi suficiente para atingir a granulometria desejada, ou seja, com partículas de diâmetro igual ou inferior ao do cimento, passantes na peneira de 75 µm, conforme descrito por Farias et al. (2023).

➤ Gipsita

Para a moagem da gipsita, utilizou-se o tempo de 30 minutos, conforme sugerido por Farias et al. (2023), os quais indicam que esse intervalo foi suficiente para a obtenção da granulometria desejada, adequada para uso na composição do cimento.

➤ Escória de alto-forno granulada

O tempo de moagem adotado para a escória de alto-forno granulada foi de 03h00min baseado no estudo de Farias et al. (2023), que demonstrou que esse intervalo foi suficiente para que o material estivesse com diâmetro igual ou inferior ao do cimento Portland.

3.3.1 Caracterização da EAF “in natura”

3.3.1.1 Caracterização física

- Composição granulométrica

Neste estudo, foi utilizada escória proveniente de uma indústria localizada no estado do Maranhão. Após a coleta do material, foram realizados ensaios de caracterização da EAF “in natura”. Um dos primeiros ensaios foi a determinação da composição granulométrica da escória, realizado no laboratório do Instituto Federal do Pará – Campus Belém. O ensaio foi conduzido de acordo com os critérios estabelecidos pela norma NBR 17054 (ABNT, 2022), obtendo-se os dados apresentados na Tabela 3.3.1.1.

Tabela 3.3.1.1 – Ensaio para composição granulométrica da EAF “in natura”

Composição granulométrica da EAF “in natura”						
Abertura peneira (mm)	Massa retida (g)	Percentual retido (%)	Percentual acumulado (%)	Percentual acumulado Passante (%)	Diâmetro máximo (mm)	Módulo de finura
6,3	5,78	0,39	0,39	99,61		
4,75	22,11	1,48	1,87	98,13		
2,36	175,73	11,78	13,64	86,36		
2	100,29	6,72	20,37	79,63	6,3	2,08
0,6	845,15	56,63	77	23		
0,15	275	18,43	95,43	4,57		
Fundo	68,23	4,57	100	0		

Fonte: Autora, 2025

A Figura 3.3.1.1.A apresenta a curva granulométrica da escória de gusa in natura, comparada aos limites de enquadramento para agregados miúdos conforme faixas de utilização recomendadas. Observa-se que a distribuição granulométrica do material difere significativamente do comportamento típico de areias naturais, apresentando retenções elevadas nas peneiras de aberturas maiores e redução abrupta nas faixas intermediárias. Esse comportamento indica uma granulometria descontinuada, reflexo do processo de resfriamento e fragmentação física característico da formação das escórias.

Ao analisar os limites inferiores e superiores da zona utilizável e da zona ótima, verifica-se que a escória in natura se posiciona parcialmente acima dos limites superiores nas primeiras peneiras (4,8 mm e 2,4 mm), demonstrando predominância de partículas mais graúdas. Por outro lado, nas faixas intermediárias (1,2 mm a 0,6 mm), a curva do material cruza os limites normativos, evidenciando ausência de frações médias e configurando distribuição aberta. Esse comportamento mantém o material fora da zona ótima estabelecida para agregados miúdos, fato que reforça sua inadequação para uso direto como areia em concretos convencionais, sem etapa prévia de beneficiamento granulométrico.

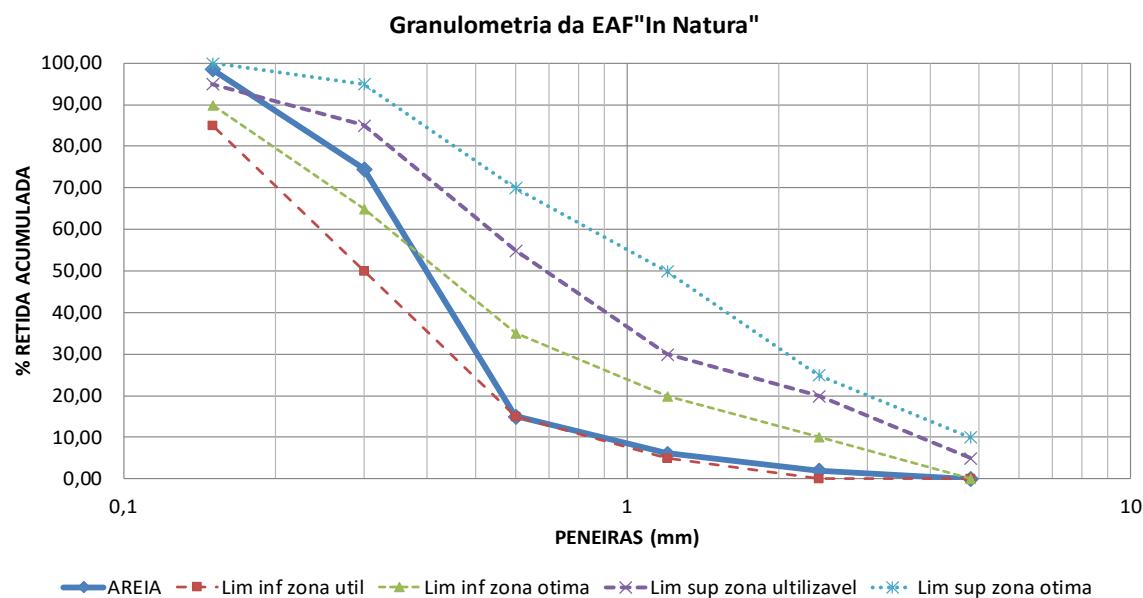
Apesar de não atender plenamente às faixas recomendadas para agregado miúdo, a escória apresenta características físicas e mineralógicas relevantes para seu aproveitamento como material cimentício suplementar após moagem. A distribuição granulométrica observada indica partículas frágeis, de origem vítreo, que se fragmentam com facilidade, comportamento típico de escórias submetidas a resfriamento rápido durante o processo siderúrgico. Esse resfriamento súbito promove alta taxa de amorfização e reduz o grau de cristalinidade dos silicatos e aluminatos presentes, conferindo ao material estrutura interna desordenada e propensão à fratura conchoidal.

Essas condições físicas e estruturais explicam o fato de que, mesmo antes da moagem, a escória apresenta indícios de potencial pozolânico. A matriz vítreo rica em silicatos e aluminatos de cálcio, aliada à fragilidade mecânica das partículas, favorece a geração de finos altamente reativos durante a moagem, permitindo que o material atinja faixas inferiores a 75 µm com relativa facilidade. Os produtos obtidos após moagem tendem

a apresentar maior área superficial específica e maior exposição de sítios reativos, fatores que contribuem para o desenvolvimento de reatividade pozolânica quando em contato com soluções alcalinas e com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento Portland.

Assim, a análise granulométrica da escória de gusa in natura não apenas confirma sua inadequação como agregado miúdo, segundo critérios granulométricos usuais, mas também evidencia características físicas e estruturais que a tornam um candidato promissor para aproveitamento como adição mineral reativa, especialmente após processo de moagem controlada.

Figura 3.3.1.1.A - Composição granulométrica da escória “in natura”



Fonte: Autora, 2025

Figura 3.3.1.1.B – Ensaio para composição granulométrica da EAF “in natura”



Fonte: Autora, 2025.

Com base nos resultados experimentais obtidos em laboratório, apresentados na Tabela 3.3.1.1, efetuou-se o cálculo do módulo de finura da amostra de escória, em conformidade os critérios estabelecidos pela norma NBR 17054 (ABNT,2022), e também foi possível visualizar o diâmetro máximo da amostra. Os dados aferidos revelam que a escória analisada nesta pesquisa apresenta um módulo de finura de 2,08, e diâmetro máximo 6,30 mm.

- Determinação da massa específica

Para determinação da massa específica da escória “in natura”, utilizou-se a norma NBR 16917 (ABNT, 2021). O ensaio foi realizado no laboratório do Instituto Federal do Pará, e determinou massa específica igual a 2,54 g/cm³ para a EAF “in natura”.

3.3.1.2 Avaliação da atividade pozolânica

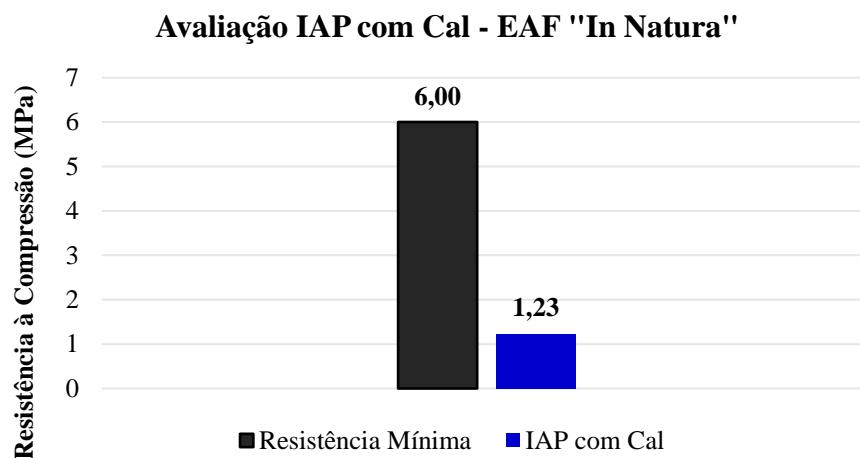
- Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal

O ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal foi conduzido conforme os procedimentos estabelecidos na norma NBR 5751 (ABNT,2015), no Laboratório do Instituto Federal do Pará. O objetivo principal foi verificar se a escória de alto-forno estudada, em seu estado bruto, apresenta reatividade com o hidróxido de cálcio, o que

poderia indicar a ocorrência de reações secundárias durante o processo de hidratação do cimento.

Conforme ilustrado no gráfico apresentado na Figura 3.3.1.2.A, observa-se que a resistência mínima exigida pela norma, de 6,00MPa, não foi atingida. A amostra de EAF “in natura” apresentou resistência à compressão axial de apenas 1,23MPa, evidenciando ausência de atividade pozolânica significativa quando “in natura”.

Figura 3.3.1.2.A – IAP com CAL utilizando a EAF “in natura”



Fonte: Autora, 2025.

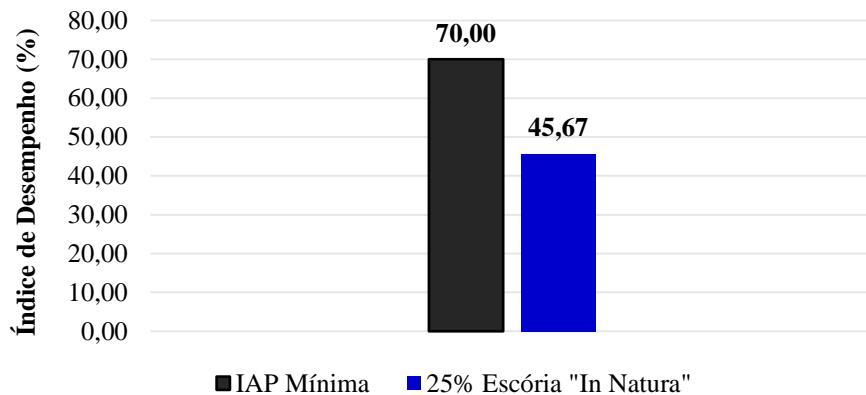
- Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento

O ensaio de IAP com cimento, seguiu os parâmetros da norma NBR 5752 (ABNT, 2014), e foi realizado no laboratório do Instituto Federal do Pará. O objetivo de realizar este ensaio é avaliar o índice de desempenho mecânico aos 28 dias, ou seja, se o material analisado contribui para o ganho de resistência aos 28 dias da mistura analisada.

Conforme visualizado no gráfico da Figura 3.3.1.2.B, no ensaio de IAP com cimento, a amostra de EAF “in natura” também não atendeu às exigências normativas. A resistência média obtida foi de 45,67 MPa, correspondendo a aproximadamente 65,24% da resistência mínima exigida pela norma, que é de 70 MPa.

Figura 3.3.1.2.B – IAP com Cimento utilizando a EAF “in natura”

Avaliação IAP com Cimento - EAF "In Natura"



Fonte: Autora, 2025.

3.3.2 Caracterização da EAF beneficiada

3.3.2.1 Caracterização física

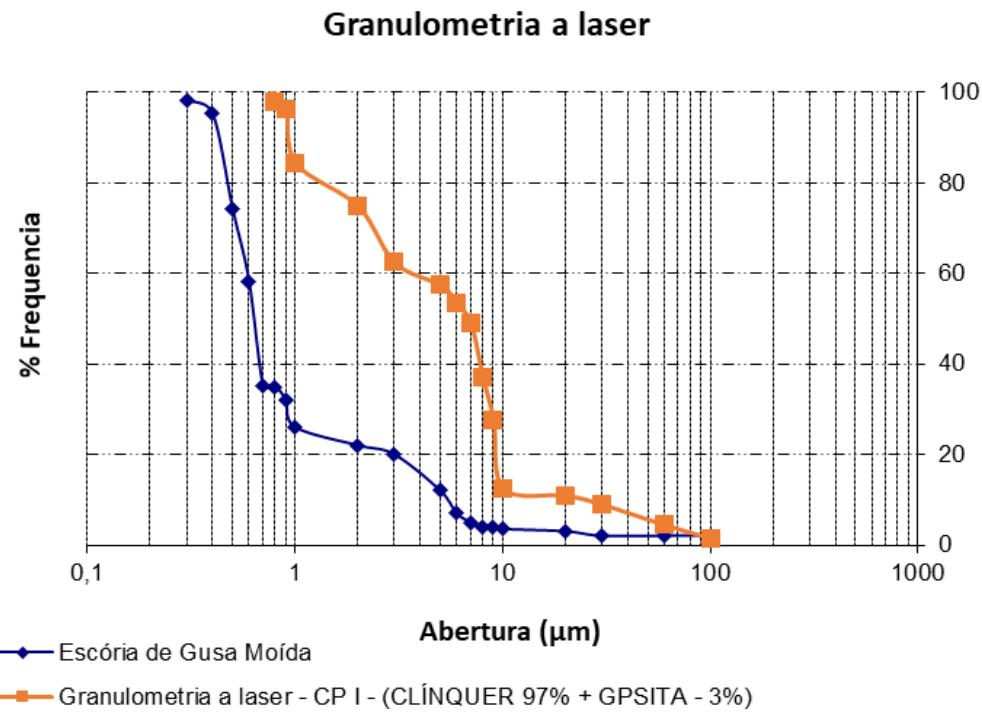
- Massa específica

O ensaio de massa específica foi realizado conforme a NBR NM 23 (ABNT, 2000), no laboratório de Instituto Federal do Pará, Campus Belém. Neste ensaio obteve-se como massa específica $3,33 \text{ g/cm}^3$, referente a EAF beneficiada.

- Granulometria a laser

Este ensaio foi realizado no laboratório da Fábrica de Cimento ELO. Na Figura 3.3.2.1, observa-se um gráfico gerado a partir dos dados obtidos nesse ensaio. Neste gráfico há um comparativo entre a granulometria da EAF beneficiada, e a granulometria de um cimento Portland CP I.

Figura 3.3.2.1 – Gráfico comparando a granulometria a laser da EAF moída com CPI



- Determinação da área específica pelo Método de Blaine

O método de Blaine foi utilizado nessa pesquisa para encontrar a área específica da EAF moída. Com base na norma que embasa o ensaio NBR NM 76 (ABNT, 1996), o limite normativo mínimo para que o material seja considerado apto a compor a classificação de materiais cimentícios é igual ou superior a 2600 cm²/g. A EAF estudada nesta pesquisa, obteve área específica igual a 4350 cm²/g.

Tabela 3.3.2.1 – Resultado do ensaio para determinação da finura da EAF

Determinação da Finura Pelo Método de Permeabilidade ao Ar	
	Área Espec. (cm ² /g)
Limite Normativo	≥ 2600
Escória de Gusa Moída	4350

Fonte: Autora, 2025

3.3.2.2 Caracterização química

- Espectrometria por fluorescência de raios X (FRX)

O ensaio de fluorescência de raio X (FRX), foi realizado conforme a NBR 14656 (ABNT, 2023), no laboratório da Fábrica de Cimento ELO. No que se refere à caracterização química, o ensaio de FRX revelou a presença dos elementos listados na Tabela 3.3.2.2, com seus respectivos quantitativos em percentual. Observa-se, ainda, a predominância de sílica (SiO₂), com um índice de 40,48%.

Tabela 3.3.2.2 – Composição química proveniente do ensaio de FRX da EAF

Fluorescência de Raios X					
Componentes químicos					
SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	SO ₃ %
40,48%	14,90%	4,57%	33,80%	4,48%	0,13%

Fonte: Autora, 2025.

- Hidrauliciadade

A classificação da escória é feita com base na relação entre os óxidos de Cálcio, Magnésio e Alumínio em relação ao óxido de silício. A hidraulicidade foi calculada acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018) e com os dados do ensaio de FRX. Como resultado do ensaio obteve-se um índice de hidraulicidade igual a 1,28%.

- Índice de consistência

Ensaio realizado no laboratório do Instituto Federal do Pará, conforme as orientações da norma NBR 13276 (ABNT 2016). Neste ensaio obteve-se diâmetro de espalhamento igual a 16,5 cm para uma quantidade de água de 200 ml. Observou-se a ausência de exsudação na argamassa, bem como a presença de coesão, indicando que, em estado fresco, seus componentes não segregam, mantendo-se homogêneos conforme Figura 3.3.1.1.C.

Figura 3.3.1.1.C – Ensaio do índice de consistência na amostra de EAF beneficiada (i) argamassa moldada no tronco cônico (ii) argamassa analisada após golpes



(i)

(ii)

Fonte: Autora, 2025.

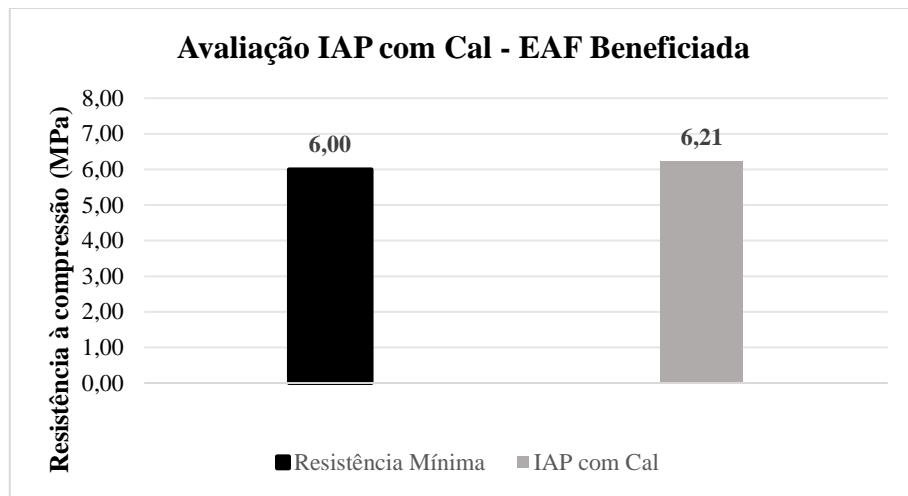
3.3.2.3 Avaliação da atividade pozolânica

- Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal

O ensaio de IAP com cal, foi realizado conforme a norma NBR 5751 (ABNT 2015), no laboratório do Instituto Federal do Pará. Com objetivo de analisar se a EAF beneficiada reage com o hidróxido de cálcio, podendo haver reações secundárias quanto a hidratação do cimento. A resistência normativa mínima aos 28 dias para este ensaio é 6,0 MPa, e a amostra

com EAF beneficiada atingiu 6,21 MPa aos 28 dias, conforme demonstrado no gráfico da Figura 3.3.2.3.A.

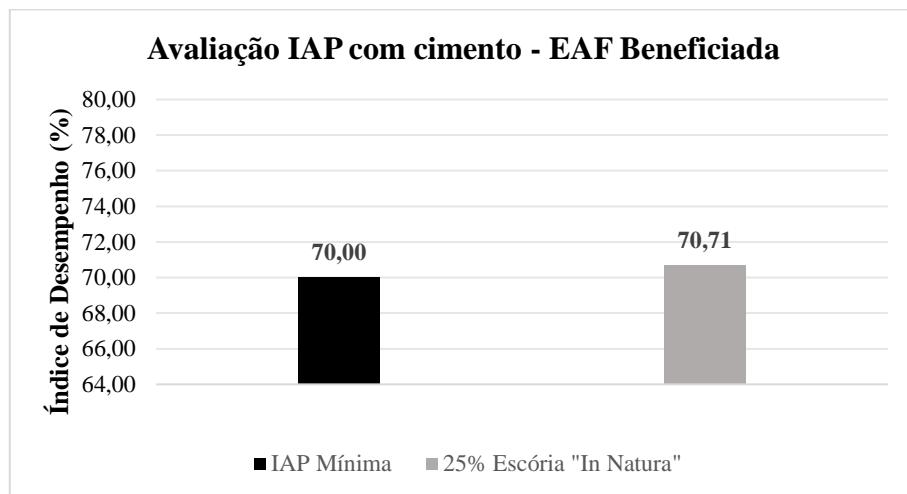
Figura 3.3.2.3.A – Avaliação de atividade pozolânica com Cal



- Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento

O ensaio de IAP com cimento foi realizado conforme os parâmetros da norma ABNT NBR 5752 (ABNT 2014), no laboratório do Instituto Federal do Pará, utilizando uma amostra de EAF beneficiada. O objetivo deste ensaio, é avaliar se o material estudado contribui para o ganho de resistência aos 28 dias, ao compor a mistura analisada no ensaio. Segundo os parâmetros normativos o índice de desempenho mínimo em percentual, deve ser 70,00% para este ensaio. Ocorre que aos 28 dias a mistura contendo EAF beneficiada, apresentou desempenho de 70,71%.

Figura 3.3.2.3.B – Avaliação de atividade pozolânica com cimento



Fonte: Autora, 2025.

3.3.2.4 Caracterização mineralógica

- Difração de raio X (DRX)

A caracterização mineralógica da escória de gusa, foi realizada por meio de Difração de Raios X (DRX), conforme apresentado na Figura 3.3.2.4, com o objetivo de identificar as fases cristalinas predominantes após o processo de beneficiamento. O ensaio foi conduzido em equipamento BRUKER D2 Phaser, utilizando radiação Cu K α ($\lambda = 1,54184 \text{ \AA}$), operando a 30 kV e 10 mA, em modo pó, com varredura de 5° a $75^\circ 2\theta$, passo de $0,02^\circ$ e tempo de passo de 0,2 s.

De maneira típica, escórias EAF apresentam uma combinação de fases cristalinas e amorfas, resultado das elevadas temperaturas do processo siderúrgico e do subsequente resfriamento rápido. A análise do difratograma permitiu identificar picos característicos associados às seguintes fases minerais mais comuns em escórias EAF:

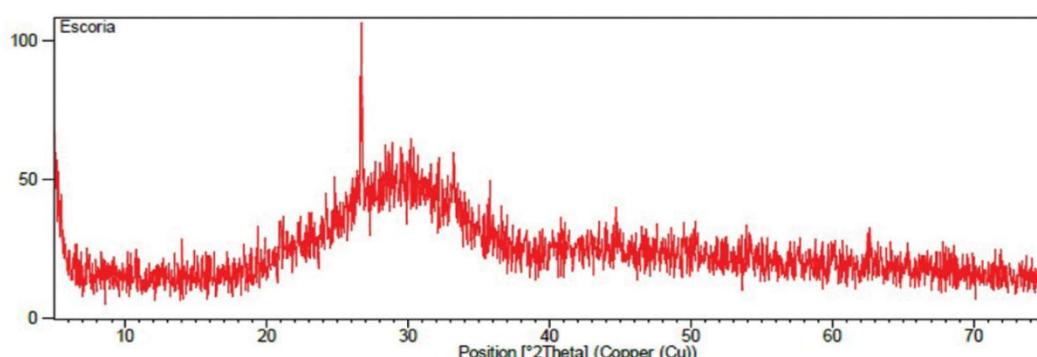
- I. Wustita (FeO) – frequentemente observada como fase dominante, com reflexões intensas próximas a $2\theta \approx 35\text{--}42^\circ$.
- II. Magnetita (Fe₃O₄) – presença comum em escórias ricas em óxidos de ferro, com picos marcantes na região de $2\theta \approx 30^\circ$, 35° e 57° .

- III. Cal-silicato (Ca_2SiO_4 / $\lambda\text{C}_2\text{S}$ e $\beta\text{-C}_2\text{S}$) – fases associadas ao sistema $\text{CaO}-\text{SiO}_2$, típicas de produtos siderúrgicos, com reflexões observadas entre $2\theta \approx 29-33^\circ$ e $41-42^\circ$.
- IV. Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) – quando presente, indica hidratação superficial ou envelhecimento da escória; reflexões em $2\theta \approx 18^\circ$.
- V. Merwinita ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$) – fase característica de processos de alta temperatura e rica em MgO , com picos entre $2\theta \approx 31-34^\circ$.
- VI. Periclásio (MgO) – mineral típico de escórias de forno elétrico, apresentando reflexões intensas em $2\theta \approx 42,9^\circ$ e $62,3^\circ$.

Além das fases cristalinas, observou-se um halo difuso entre $2\theta \approx 25-35^\circ$, indicando a presença de uma fração amorfa significativa, característica das escórias solidificadas rapidamente. Essa porção amorfa contribui para reatividade potencial, especialmente em sistemas cimentícios, podendo favorecer comportamento pozolânico ou latente hidráulico dependendo do tratamento e da composição química.

A distribuição e intensidade dos picos observados são compatíveis com o comportamento mineralógico esperado para escórias EAF beneficiadas, revelando predominância de óxidos de ferro e fases do sistema $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{MgO}$. O difratograma obtido confirma que o material apresentou estrutura heterogênea, composta por fases cristalinas típicas de resfriamento industrial aliado a um percentual considerável de fase vítreia, atributo favorável para aplicações em matrizes cimentícias.

Figura 3.3.2.4 – Caracterização mineralógica, ensaio DRX, EAF beneficiada



Fonte: Autora, 2025.

3.3.2.5 Caracterização ambiental

- Lixiviação

O ensaio de extrato lixiviado foi realizado conforme as recomendações da norma NBR 10005 (ABNT, 2004), no laboratório da Fábrica de Cimento ELO. Esse ensaio tem por objetivo analisar o potencial de contaminação por metais pesados ou outros compostos tóxicos. Observa-se na tabela da Figura 3.3.2.5.A, os resultados do presente ensaio. Após esta análise, verificou-se que os limites normativos foram alcançados.

Figura 3.3.2.5.A – Ensaio ambiental extrato lixiviado em uma amostra de EAF beneficiada

Escória de Alto-Forno beneficiada			
NBR 10.005 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos			
Elemento	Concentração permitida (mg/L) (Pelo Anexo F da NBR 10.004)	Concentração Lida (mg/L)	Situação
Cádmio	0,5	0,005	Abaixo do Limite Máximo
Cobre	-	0,035	O elemento não se encontra no anexo da norma
Cromo	5	0,3971	Abaixo do Limite Máximo
Ferro	-	1,6686	O elemento não se encontra no anexo da norma
Manganês	-	4,6696	O elemento não se encontra no anexo da norma
Zinco	-	0,3545	O elemento não se encontra no anexo da norma

Fonte: Autora, 2025.

- Solubilidade

O ensaio com extrato solubilizado é outro ensaio que compõe as análises ambientais. Ele visa identificar substâncias que podem ser liberadas em condições de uso ou descarte. O

ensaio foi realizado conforme a norma NBR 10006 (ABNT, 2004), no laboratório da Fábrica de Cimento ELO. Os dados obtidos no ensaio foram organizados na tabela da Figura 3.3.2.5.B, e todos os elementos analisados constaram como abaixo do limite normativo.

Figura 3.3.2.5.B – Ensaio ambiental extrato solubilizado em uma amostra de EAF beneficiada

Escória de Alto-Forno beneficiada			
NBR 10.006 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos			
Elemento	Concentração permitida (mg/L) (Pelo Anexo F da NBR 10.004)	Concentração Lida (mg/L)	Situação
Cádmio	0	-0,0122	Concentração abaixo do limite de detecção do equipamento
Cobre	2	-0,0076	Concentração abaixo do limite de detecção do equipamento
Crômo	0,1	0,0058	Abaixo do Limite Máximo
Ferro	0,3	-0,0854	Concentração abaixo do limite de detecção do equipamento
Manganês	0,1	0,0065	Abaixo do Limite Máximo
Zinco	5	0,1087	Abaixo do Limite Máximo

Fonte: Autora, 2025.

3.4 CONCLUSÕES

Após análises físicas, químicas, mineralógicas, ambientais e de atividade pozolânica, foi possível concluir que a escória granulada de alto-forno (EAF) beneficiada, proveniente de uma indústria do oeste maranhense, apresenta características adequadas para aplicação como material cimentício suplementar na fabricação de cimento Portland de alto-forno (CP III-E 32), conforme estabelecido pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

Os ensaios físicos demonstraram que o beneficiamento conferiu à EAF propriedades essenciais para seu uso em matrizes cimentícias, como elevada finura (diâmetro predominante inferior a 75 µm) e área superficial específica de 4.350 cm²/g, superando os requisitos mínimos normativos e indicando alta reatividade (SNELLINGS et al., 2012). A massa específica aumentou significativamente após o beneficiamento (3,33 g/cm³), evidenciando maior compactação microestrutural devido à reorganização atômica e redução de porosidade (BOEIRA; BECK, 2007).

Quimicamente, a EAF beneficiada apresentou alto teor de sílica (40,48%) em estrutura amorfa, típica de materiais vítreos, o que favorece a formação de compostos hidratados (C-S-H) durante a hidratação do cimento (CECHIN et al., 2018). O índice de hidraulicidade classificou-a como material básico e apto a contribuir para a resistência mecânica do cimento. Além disso, os ensaios de atividade pozolânica (IAP com cal e cimento) comprovaram sua reatividade, com resultados de 6,21 MPa e 70,71%, respectivamente, atendendo aos parâmetros normativos. Esses resultados foram possíveis graças ao beneficiamento da escória, que aumentou sua reatividade por meio da ruptura de ligações inertes e formação de fases vítreas (LOTHENBACH et al., 2011; BOEIRA; BECK, 2007).

A avaliação ambiental, por meio de lixiviação (NBR 10005) e solubilização (NBR 10006), confirmou a estabilidade do material, com concentrações de elementos abaixo dos limites regulatórios, garantindo seu uso seguro. Mineralogicamente, a predominância de fases amorfas após o beneficiamento reforça seu potencial como substituto parcial do clínquer (NEHDI, 2014; MEHTA & MONTEIRO, 2014). O difratograma de raios X da escória resfriada instantaneamente e beneficiada apresenta baixa intensidade (eixo y) e ausência de picos definidos, caracterizando um material completamente amorfo, sem estrutura cristalina detectável.

Em síntese, a EAF caracterizada neste estudo reúne atributos técnicos e ambientais que a qualificam para composição de cimentos sustentáveis, reduzindo a demanda por clínquer e, consequentemente, as emissões de CO₂ associadas à produção de cimento. Os

resultados fornecem subsídios para aplicações industriais na região, alinhando eficiência técnica à responsabilidade ambiental. Recomendam-se estudos complementares para avaliar o desempenho do cimento produzido em escala real e sua durabilidade em obras de engenharia.

3.5 REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004. Resíduos sólidos – Classificação – Parte 1: Requisitos de classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10005. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10006. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13276. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14656. Cimento Portland e matérias-primas — Análise química por espectrometria de raios X — Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2023.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16372. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).** Rio de Janeiro, 2015.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16697. Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16917. Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 17054. Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2022.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5751. Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias.** Rio de Janeiro, 2015.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5752. Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro, 2014.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 23. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica.** Rio de Janeiro, 2000.

AHMAD, Jawad; KONTOLEON, Karolos J.; MAJDI, Ali; NAQASH, Muhammad Tayyab; DEIFALLA, Ahmed Farouk; KAHLA, Nabil Ben; ISLEEM, Haytham F.; QAIDI, Shaker M. A. **A comprehensive review on the ground granulated blast furnace slag (GGBS) in concrete production. Sustainability**, v. 14, p. 8783, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14148783>. Acesso em: 18 set. 2024.

ALMEIDA JÚNIOR, Joaquim Paulo de; SOUSA, Ísis da Rocha; SILVA NETO, Arabutan Maracaipe da; SILVA, Marcelo Francisco da; PEREIRA FILHO, Jurandir. **Dinâmica de uso e ocupação do solo gerado pelo desenvolvimento agropecuário e industrial em Açaílândia-MA, na Amazônia Oriental Brasileira. Revista Caderno Pedagógico – Studies Publicações e Editora Ltda.**, Curitiba, v. 21, n. 8, p. 1-21, 2024. DOI: 10.54033/cadpedv21n8-031.

BARROS, Leandro Henrique Costa; MACEDO, Alcebiades Negrão. **Análise do uso de rejeito de bauxita como adição pozolânica para cimento Portland. Cerâmica Industrial**, v. 30, e0930, 2025. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/10.4322/cerind.2025.009/pdf/ci-30-e0930.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2025. <https://doi.org/10.4322/cerind.2025.009>. ISSN 1413-4608.

BOEIRA, Alexandre Pitol; BECK, Daniel. **Notas de aula da disciplina Tecnologia dos Materiais.** Curso Técnico em Mecânica Industrial. Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas – RS, Unidade de Ensino Passo Fundo. Passo Fundo, RS: Ministério da Educação, Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica, 2007.

CECHIN, Luana; MATOSKI, Adalberto; LIMA, Adauto José Miranda de; WEBER, Alessandra Monique; TOKARSKI, Rosângela Basso. **Efeito da adição de escória de alto-forno em compósitos com bambu mossô. Revista Matéria**, [S.l.], v. 23, n. 4, e12240, 2018. ISSN 1517-7076. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0574>. Acesso em: 10 abr. 2025.

DINA, M. S. **Effect of cooling technique of blast furnace slag on the thermal behavior of solid cement bricks. Journal of Cleaner Production**, v. 79, p. 134-141, 2014.

FARIAS, M. M.; FARIAS, C. L. R.; PICANÇO, M. S. **Escória de alto-forno como substituição parcial ao cimento Portland. Revista Matéria**, v. 28, n. 2, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/nC5DgffDJ53ZgPL5G8wyDHb/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 8 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0120>.

GOMES, Daniella Amorim; TAVARES, Daniel Pimentel; CORREA, Welder da Silva. **Avaliação técnica da fabricação de concreto com agregado de escória de alto-forno.** In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ENTAC, 2020.

GOOGLE. **Google Earth.** Disponível em: <https://earth.google.com>. Acesso em: 2 abr. 2025.

INDIAN BUREAU OF MINES. **Slag - Iron and Steel. Indian Minerals Yearbook 2018 (Part II: Metals and Alloys).** 57th ed. Nagpur: Ministry of Mines, Government of India, 2018. Disponível em: www.ibm.gov.in. Acesso em: 29 mar. 2025.

LIU, Xing; XIAO, Guiyuan; YANG, Dunhan; DAI, Lin; TANG, Aiwei. **Sustainable cementitious materials: Strength and microstructural characteristics of calcium carbide residue-activated ground granulated blast furnace slag–fly ash composites.** Sustainability, v. 16, p. 11168, 2024. DOI: 10.3390/su162411168.

LOTHENBACH, Barbara; SCRIVENER, Karen; HOOTON, R. D. **Supplementary cementitious materials.** Cement and Concrete Research, [S.l.], v. 41, n. 12, p. 1244–1256, dez. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/241089075_Supplementary_Cementitious_Materials. Acesso em: 9 abr. 2025. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.12.001.

MANCINI, A. et al. **Iron speciation in blast furnace slag cements.** Cement and Concrete Research, v. 140, p. 106287, 2021. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106287.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials.** 4th ed. McGraw-Hill, 2014.

NEHDI, Moncef L. **Clay in cement-based materials: critical overview of state-of-the-art.** Construction and Building Materials, [S.l.], v. 51, p. 372–384, 2014. Elsevier BV. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181300980X>. Acesso em: 9 abr. 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.059. ISSN 1879-0526.

ÖZBAY, E.; ERDEMIR, M.; DURMUS, H. I. **Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review.** Construction and Building Materials, v. 105, p. 423-434, 2016.

PIMENTEL, Maurílio Gomes; VASCONCELOS, Adriano Luiz Roma; PICANÇO, Marcelo de Souza; SOUZA, José Victor Brasil de; MACÊDO, Alcebíades Negrão. **Caracterização da escória de alto-forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil.** In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA – CONTECC’2017, 2017, Belém. Anais... Belém: CONFEA, 2017.

PIMENTEL, Maurílio Gomes; VASCONCELOS, Adriano Luiz Roma; PICANÇO, Marcelo de Souza; SOUZA, José Victor Brasil de; MACÊDO, Alcebíades Negrão. **Caracterização**

da escória de alto forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil. Brazilian Applied Science Review, Curitiba, v. 3, n. 2, p. 895–907, 2019. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BASR/article/view/927>. Acesso em: 9 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.34115/basr.v3i2.927>. ISSN 2595-3621.

SÁ, Evelyn Moraes Hosken de. **Avaliação do uso da escória de aciaria como agregado e ligante em materiais álcali-ativados.** 2021. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil, Belo Horizonte, 2021.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório anual 2023.** Brasília, DF: SNIC, 2023. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/1732731328.pdf. Acesso em: 2 abr. 2025.

SNELLINGS, Ruben; MERTENS, Gilles; ELSEN, Jan. **Supplementary Cementitious Materials. Reviews in Mineralogy & Geochemistry**, [S.l.], v. 74, p. 211–278, 2012. DOI: 10.2138/rmg.2012.74.6.

THOMAZ, Eduardo C. S. **Escória de alto-forno: parte 1 - fabricação.** Disciplina Cimentos e Concretos. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia – IME, 2012. Nota de aula. Disponível em: http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/escoria_fabricacao.pdf. Acesso em: 27 mar. 2025.

4. MELHORIA DA MISTURA DE MATÉRIAS-PRIMAS PARA FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO, NA REGIÃO OESTE DO MARANHÃO

RESUMO

A redução das emissões de CO₂ na indústria cimenteira exige alternativas sustentáveis, como a substituição parcial do clínquer (Lothenbach et al., 2011; Zunino & Scrivener, 2024), principal fonte de emissões devido à calcinação do calcário e queima de combustíveis (IPCC, 2023). No Brasil, as emissões relacionadas à fabricação de cimento Portland caíram 17% desde 1990, mas permanecem acima da média global (580 kg/t contra 608 kg/t) (SNIC, 2023). Este estudo visa otimizar a proporção de matérias-primas para produção de cimento Portland de alto-forno no oeste maranhense, conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018). O cimento padrão CP III-E 32 fabricado nesta indústria contém 65% de clínquer e 35% de EAF (REF). Foram formulados quatro protótipos com variações na composição: 55% Clínquer/45% EAF (AM01); 45% Clínquer/55% EAF (AM02); 35% Clínquer/65% EAF (AM03); e 25% Clínquer/75% EAF (AM04). As amostras AM01 e AM02 apresentaram o melhor desempenho pozolânico, comprovando a viabilidade técnica da substituição. Essa abordagem reduz emissões e alia eficiência à sustentabilidade na produção cimenteira.

Palavras-chave: Escória de Alto-Forno; Clínquer; Cimento Portland, Materiais cimentícios suplementares.

ABSTRACT

Reducing CO₂ emissions in the cement industry requires sustainable alternatives, such as partial clinker substitution (Lothenbach et al., 2011; Zunino & Scrivener, 2024), the main emission source due to limestone calcination and fuel combustion (IPCC, 2023). In Brazil, emissions related to Portland cement production have decreased by 17% since 1990 but remain above the global average (580 kg/t vs 608 kg/t) (SNIC, 2023). This study aims to optimize the raw material ratio for blast furnace Portland cement production in western Maranhão, following NBR 16697 standards (ABNT, 2018). The standard CP III-E 32 cement produced in this industry contains 65% clinker and 35% GGBFS (REF). Four prototype compositions were developed: 55% clinker/45% GGBFS (AM01); 45% clinker/55% GGBFS (AM02); 35% clinker/65% GGBFS (AM03); and 25% clinker/75% GGBFS (AM04). Samples AM01 and AM02 showed the best pozzolanic performance, proving the technical feasibility of substitution. This approach reduces emissions while combining efficiency with sustainability in cement production.

Keywords: Blast Furnace Slag; Clinker; Portland Cement; Supplementary Cementitious Materials

4.1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é um dos pilares do desenvolvimento socioeconômico, impulsionando a geração de empregos, a expansão da infraestrutura e o crescimento econômico (CUNHA, 2022; DOS SANTOS PEREIRA et al., 2022). No Brasil, esse setor demonstra sua relevância através de indicadores como o consumo de cimento, que em fevereiro de 2025 registrou vendas de 5,1 milhões de toneladas, um aumento de 7,5% em relação ao mesmo período do ano anterior (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2024). Esse crescimento reflete a demanda por habitação e infraestrutura, essenciais para o progresso do país, especialmente em um momento em que o Brasil se prepara para sediar a COP 30, reforçando a necessidade de aliar desenvolvimento econômico à sustentabilidade ambiental.

No entanto, a produção de cimento Portland, material fundamental para a construção civil, é uma das atividades industriais que mais contribuem para as emissões de gases do efeito estufa (GEE). Estima-se que o setor cimenteiro seja responsável por 6-7% das emissões globais de CO₂ (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Esse impacto decorre principalmente da calcinação do calcário, que responde por aproximadamente 52% das emissões, enquanto o consumo de energia representa o restante (WORRELL et al., 2001). No Brasil, embora as emissões relacionadas à fabricação de cimento tenham caído 17% desde 1990, ainda permanecem acima da média global, com 580 kg de CO₂ por tonelada de cimento produzido (SNIC, 2023).

Além dos desafios ambientais, o aumento do consumo de cimento gera pressão sobre as reservas de matérias-primas, muitas vezes insuficientes para atender à demanda do mercado (COSTA et al., 2022). Diante desse cenário, a substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares, como a escória de alto-forno (EAF), surge como uma alternativa viável para reduzir as emissões de CO₂ e minimizar a extração de recursos naturais (LOTHENBACH et al., 2011; ZUNINO; SCRIVENER, 2024). A EAF, um subproduto da produção de ferro-gusa, é gerada em grandes quantidades nas siderúrgicas, estimando-se entre 200 a 300 kg por tonelada de ferro produzido (JOHN; AGOPYAN, 2000). Esse material, quando submetido a processos de moagem, apresenta propriedades

pozolânicas que o tornam adequado para uso em composições cimentícias (PAGIO et al., 2022).

Desde meados do século XX, adições minerais como cinzas volantes e escórias têm sido incorporadas ao cimento Portland para reduzir impactos ambientais e promover a logística reversa de resíduos industriais (ISAIA, 2010 apud CUNHA, 2022). Estudos recentes, como o de Marçal et al. (2025), comprovam que a EAF coletada em uma indústria de cimento no oeste maranhense, após beneficiamento por moagem, apresenta desempenho satisfatório como material cimentício suplementar, destacando-se como uma opção promissora para a substituição parcial do clínquer. No entanto, são necessárias mais pesquisas para avaliar os efeitos dessa adição em compósitos cimentícios, especialmente em relação à durabilidade e resistência mecânica (SCRIVENER, 2022; SONG, 2006).

Nesse contexto, este estudo tem como objetivo caracterizar misturas de cimento Portland com diferentes proporções de EAF (55%, 45%, 35% e 25% de clínquer substituído), avaliando suas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais, bem como seu desempenho em ensaios de reação álcali-agregado, absorção de água e resistência à compressão axial. A pesquisa busca determinar a viabilidade técnica da produção de cimento CP III-E 32 com reduzido teor de clínquer, contribuindo para uma produção mais sustentável e alinhada às demandas ambientais globais.

4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1 Materiais

- Clínquer

O clínquer empregado neste estudo foi disponibilizado por uma fábrica de cimento situada no município de Açailândia, no Maranhão. O material foi cedido exclusivamente para fins de pesquisa, garantindo que suas características correspondam às utilizadas no processo produtivo real da empresa.

- Gipsita

A gipsita utilizada nas composições também teve origem na mesma indústria cimenteira. Sua inclusão nas misturas seguiu os padrões normativos para compor cimentos, e é derivada da linha de produção da mesma empresa.

- Escória de alto-forno granulada (EAF)

Assim como o clínquer e a gipsita, a escória granulada de alto-forno (EAF) foi fornecida pela indústria de Açailândia/MA. Vale destacar que esse subproduto siderúrgico já é utilizado pela empresa na fabricação de cimentos tipo CP III, reforçando sua aplicabilidade prática no presente estudo.

Para avaliar uma alternativa sustentável para a indústria cimenteira do Oeste Maranhense, este estudo analisou a substituição parcial do clínquer por escória granulada de alto forno (EAF) na produção de Cimento Portland CP-III-E-32. A proposta visa aproveitar um resíduo da siderurgia, reduzindo os percentuais de clínquer e promovendo uma solução economicamente viável e ambientalmente favorável.

Os impactos dessa substituição foram avaliados, através de um cimento de referência (REF), seguindo as proporções tradicionais utilizadas pela indústria maranhense em questão. Paralelamente, foram desenvolvidas quatro protótipos, nos quais o teor de clínquer foi gradualmente reduzido e substituído por EAF em diferentes proporções: 45% EAF (AM01), 55% EAF (AM02), 65% EAF (AM03) e 75% EAF (AM04). Essas variações permitiram analisar como a adição crescente de EAF influencia as propriedades do cimento.

- Preparação das amostras

A preparação das amostras seguiu os requisitos da norma NBR 16697 (ABNT, 2018), assegurando o cumprimento de todos os parâmetros técnicos estabelecidos. Entre as composições analisadas, a amostra AM04 (com 75% de EAF) representa o limite máximo permitido pela norma, conforme demonstrado na Tabela 4.2.A. Além disso, as proporções detalhadas de cada protótipo utilizado no estudo (incluindo as variações de clínquer e EAF)

estão descritas na Tabela 4.2.B, permitindo uma análise precisa do impacto dessas substituições nas propriedades do cimento.

Tabela 4.2.1.A - Limites normativos estabelecidos pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018) para fabricação de cimentos de alto-forno

Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa) NBR 16697 (ABNT, 2018)							
Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio (%)	Escória granulada de alto-forno (%)	Material pozolânico (%)	Material carbonático (%)
Cimento Portland de Alto Forno	CP III	25, 32 ou 40	RS ou BC	25 – 65	35 – 75	0	0 – 10

Fonte: Adaptado de NBR16697 (ABNT, 2018)

Tabela 4.2.1.B – Nomenclatura e percentuais das matérias-primas componentes dos protótipos

Protótipos estudo MARÇAL (2025)						
Protótipo	Classe de resistência	Clínquer (%)	Gipsita (%)	Escória granulada de alto- forno (%)	Material pozolânico	Material carbonático
REF		65		35		
AM01		55		45		
AM02	32	45	3	55	0	0
AM03		35		65		
AM04		25		75		

Fonte: Autora (2025)

4.2.2 Métodos

Para caracterizar os materiais utilizados (clínquer, gipsita e escória granulada de alto-forno - EAF), foram realizados ensaios físico-químicos, mineralógicos e mecânicos, conforme detalhado nas Tabelas 4.2.2.A e 4.2.2.B. A caracterização da EAF foi baseada nos

resultados publicados por Marçal et al. (2025). Esses ensaios permitiram avaliar propriedades como consistência, granulometria, composição química, microestrutura e resistência à compressão, garantindo a qualidade e conformidade dos materiais e compósitos produzidos.

Tabela 4.2.2.A – Normas para caracterização física e química dos materiais gipsita e clínquer

Normas para ensaios de Caracterização dos materiais: Gipsita e Clínquer		
Caracterização	Ensaio	Método
Física	Determinação da área específica pelo método de Blaine	NBR 16372 (ABNT,2015)
	Índice de consistência	NBR 13276 (ABNT 2016)
	Massa específica	NBR NM 23 (ABNT, 2000)
	Granulometria a laser	Procedimento
Química	Espectrometria por fluorescência de raios X - FRX	NBR 14656 (ABNT, 2023)

Fonte: Autora (2025)

Tabela 4.2.2.B – Normas para caracterização dos protótipos de cimento Portland

Normas para caracterização dos protótipos de Cimento Portland		
Caracterização	Ensaio	Método
Física	Índice de consistência da pasta	NBR 13276 (ABNT 2016)
	Início e fim de pega	NBR NM 65 (ABNT, 2002)
	Granulometria a laser	Procedimento
	Área específica Blaine	NBR 16372 (ABNT,2015)
	Percentual passante na peneira 75 µm	NBR 11579 (ABNT, 2012)
Química	Teor de SO ₃ (óxido de enxofre)	NBR 17086-5 (ABNT, 2023)
	Resíduo insolúvel (R.I.)	NBR 17086-4 (ABNT, 2023)
	Perda ao fogo	NBR NM 18 (ABNT, 2012)
Mineralógica	Difração de raio X - DRX	Procedimento
Análise microestrutural	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	Procedimento
Avaliação de resistência a compressão axial	Resistencia a compressão axial	NBR 7215 (ABNT, 2025)
Avaliação da reação alcali-agregado (RAA)	Reatividade alcali-agragado	NBR 15577-4 (ABNT, 2018)
Avaliação de absorção de água	Absorção por capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2005)
	Absorção por imersão	NBR 9779 (ABNT, 2012)
	Índice de vazios	NBR 9779 (ABNT, 2012)

Fonte: Autora (2025)

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS

4.3.1 Caracterização física

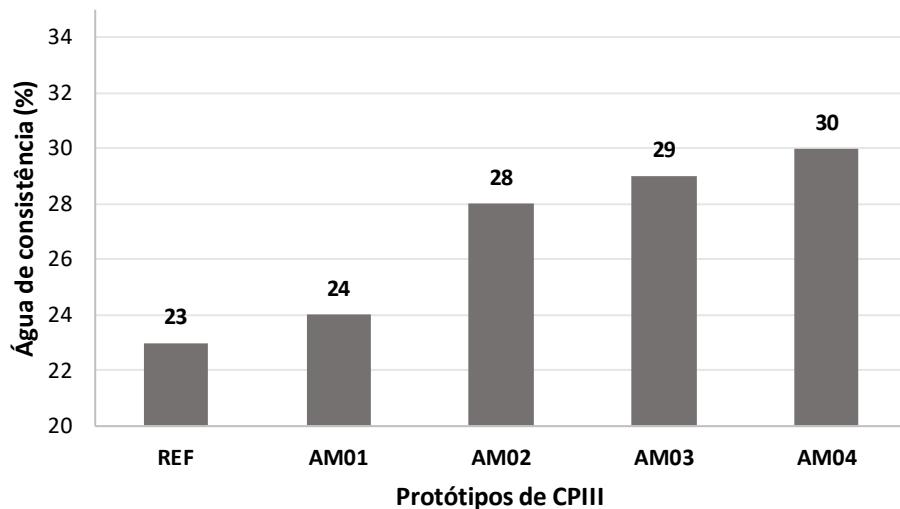
- Índice de consistência da pasta

Este estudo, conduzido no Instituto Federal do Pará (IFPA), campus Belém, seguiu as diretrizes estabelecidas pela norma NBR NM 43 (ABNT, 2002) para a determinação do percentual de água de consistência em pastas de cimento. O objetivo principal foi avaliar a influência da substituição parcial de clínquer por escória de alto-forno (EAF) nas propriedades reológicas das pastas, especificamente no teor de água necessário para atingir a consistência normalizada.

Foi possível observar que a amostra de referência REF, composta por 35% de EAF, apresentou um percentual de água de consistência menor em comparação à amostra AM04, que contém 75% de EAF, conforme visualizado no gráfico da Figura 4.3.1.A

Figura 4.3.1.A – Gráfico da água de consistência em relação ao percentual de escória

**Determinação da pasta de consistência normal
NBR NM 43, ABNT 2002**

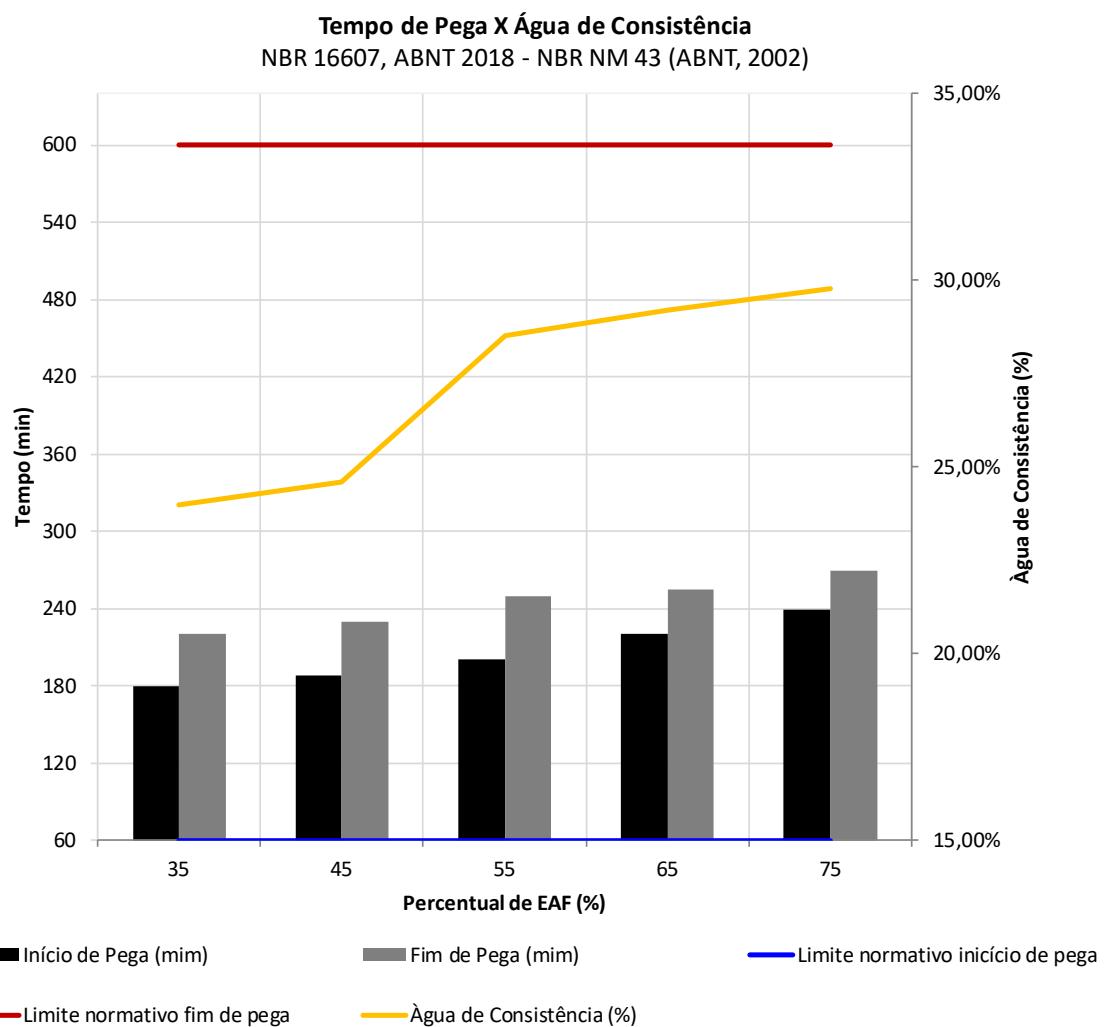


Fonte: Autora (2025)

- **Tempo de pega**

O ensaio de tempo de pega foi realizado seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 16607 (ABNT, 2018) nas instalações do laboratório de controle tecnológico da empresa TotalMIX Controle. Durante a execução dos testes, observou-se uma clara correlação entre o aumento do teor de escória de alto-forno (EAF) na composição dos protótipos e as alterações nas características de pega das pastas cimentícias.

Figura 4.3.1.B – Gráfico que relaciona o tempo em minutos e o percentual de água.



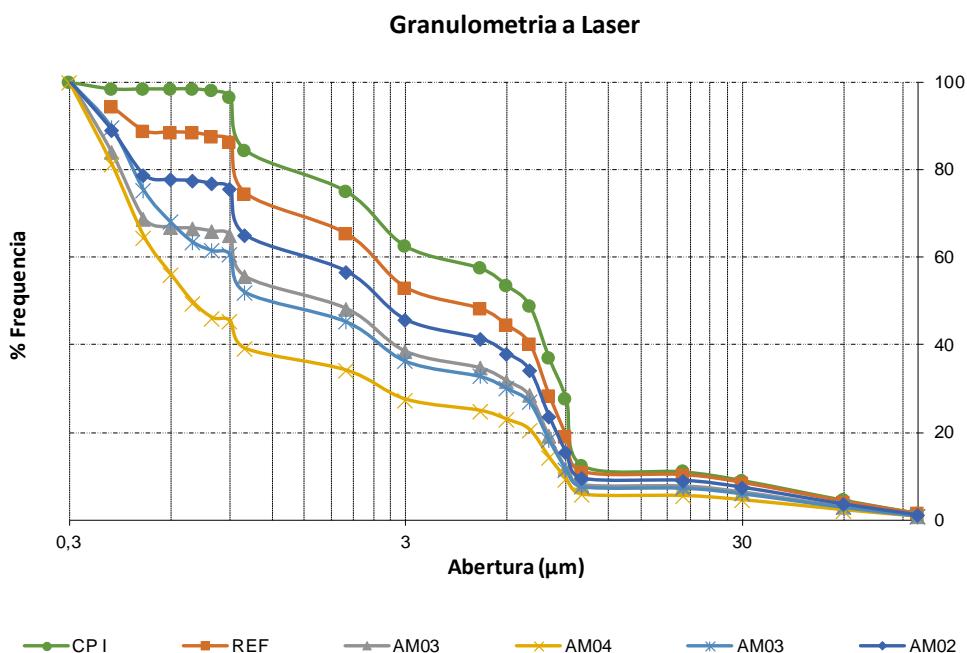
Fonte: Autora (2025)

Observou-se que as amostras com maiores percentuais de EAF apresentaram simultaneamente maiores demandas de água para atingir a consistência normal e tempos de pega mais prolongados, tanto para o início quanto para o término do processo, conforme observado no gráfico da Figura 4.3.1.B.

- Granulometria a laser

O ensaio de granulometria a laser (realizados na fábrica de Cimento ELO), embora não normativo, foi empregado nesta pesquisa para determinar a distribuição granulométrica dos materiais finos que compõem os cinco protótipos analisados. O equipamento utilizado neste ensaio foi da marca Malvern Panalytical, modelo Mastersizer 3000+ Ultra, substituindo o fluido padrão (água) por querosene mantendo a temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Os resultados obtidos estão representados no gráfico da Figura 4.3.1.C, onde se observa que todos os protótipos se apresentaram bem distribuídos quanto a granulometria. Foi utilizado a distribuição granulométrica de um cimento Portland CPI, que é puro em sua composição para fazer comparações.

Figura 4.3.1.C – Gráfico referente ao ensaio de granulometria a laser



Fonte: Autora (2025)

- Área específica – Método de Blaine

O ensaio de determinação da área específica foi, realizado laboratório da Fábrica de Cimento ELO, e conduzido em conformidade com a norma NBR NM 76 (ABNT, 1996), tendo todos os protótipos analisados apresentado resultados dentro dos limites estabelecidos pela referida norma, conforme consta na Tabela 4.3.1 a seguir.

Tabela 4.3.1.A – Tabela com resultado da área específica de cada protótipo

Determinação da Finura Pelo Método de Permeabilidade ao Ar	
Protótipo	Área Espec. (cm ² /g)
REF	4351
AM01	4562
AM02	4621
AM03	4865
AM04	5135

Fonte: Autora (2025)

- Percentual passante nas peneiras 75 µm e 45 µm

O ensaio de finura do cimento Portland foi conduzido seguindo os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018), que especifica um percentual máximo de 8% de material retido na peneira 75 µm para cimentos Portland CPIII 32. Além do procedimento normativo, este trabalho incluiu uma análise complementar utilizando a peneira 45 µm, como adotado usualmente em fabricas de cimento. Os resultados obtidos, foram apresentados na Tabela 4.3.1.B.

Tabela 4.3.1.B – Tabela com os resultados referentes ao ensaio de finura do cimento.

Percentual passante - Finura do Cimento Portland NBR 16697 (ABNT 2018)		
Protótipo	Percentual passante (%)	
	Peneira 75 µm	Peneira 45 µm
Límite normativo: CPIII 32 ≤ 8%		-
REF	2,90%	4,50%
AM01	2,10%	3,50%
AM02	2,60%	4,50%
AM03	3,10%	4,90%
AM04	3,50%	5,60%

Fonte: Autora (2025)

4.3.2 Caracterização química

- Fluorescência de raios X (FRX)

O ensaio de fluorescência de raios X (FRX) foi conduzido de acordo com a NBR 14656 (ABNT, 2023) no Laboratório do CRTI/UFG (Centro de Recursos Tecnológicos e Inovação da Universidade Federal de Goiás). Foram realizadas em um espectrômetro WDS Bruker S8 Tiger, equipado com tubo de Rh. Para análise dos elementos maiores, utilizou-se o pacote GeoQuant M® Bruker. A análise química por FRX permitiu identificar e quantificar os óxidos presentes nas amostras, conforme detalhado na Tabela 4.3.2.A.

Tabela 4.3.2.A – Tabela com o resultado do ensaio de FRX para os protótipos de cimento.

Fluorescência de raios X - FRX NBR 14656 (ABNT, 2023)					
Óxidos Analisados (%)	REF	AM01	AM02	AM03	AM04
SiO ₂	23,87	28,86	31,90	33,67	70,50
TiO ₂	0,36	0,44	0,52	0,57	0,16
Al ₂ O ₃	6,99	8,20	9,91	10,75	15,40
Fe ₂ O ₃	3,34	3,87	4,40	4,93	1,44
MnO	0,69	0,72	1,06	1,24	< LQ
MgO	4,02	5,00	5,25	5,43	0,32
CaO	47,44	48,30	42,14	38,63	1,12
Na ₂ O	0,32	0,34	0,36	0,36	3,70
K ₂ O	0,74	0,80	0,86	0,86	4,57
P ₂ O ₅	< LQ	0,21	1,11	< LQ	0,36
SO ₃	2,65	2,34	2,34	2,03	1,72
LOI	1,99	1,67	1,24	1,37	1,77
Soma	100,63	100,67	100,09	99,84	99,35

(<LQ) = Abaixo do limite quantificável

Fonte: Autora (2025)

- Teor de trióxido de enxofre SO₃

Neste ensaio foram medidos os percentuais de SO₃ de cada um dos protótipos desta pesquisa. Os resultados estão inseridos na Tabela 4.3.2.B abaixo. O ensaio foi realizado conforme a norma NBR 17086-5 (ABNT, 2023) laboratório da Fábrica de Cimento ELO.

Tabela 4.3.2.B – Resultado do ensaio para percentuais de trióxido de enxofre nos protótipos

Teor de Trióxido de Enxofre (SO₃) NBR 17086-5 (ABNT, 2023)	
Protótipo	Teor SO₃ Limite normativo CPIII ≤ 4,5
REF	3,01%
AM01	2,95%
AM02	2,94%
AM03	2,93%
AM04	3,02%

Fonte: Autora (2025)

- Resíduos insolúveis (RI)

Os ensaios de resíduos insolúveis, realizados nos cinco protótipos conforme a norma NBR 17086-4 (ABNT, 2023). Este ensaio foi realizado no laboratório da Fábrica de Cimento ELO.

Tabela 4.3.2.C – Resultados dos ensaios de resíduos insolúveis.

Resíduos insolúveis (R.I.) NBR 17086-4 (ABNT 2023)	
Protótipo	R.I Limite normativo CPIII ≤ 5,0
REF	0,21%
AM01	0,19%
AM02	0,18%
AM03	0,18%
AM04	2,10%

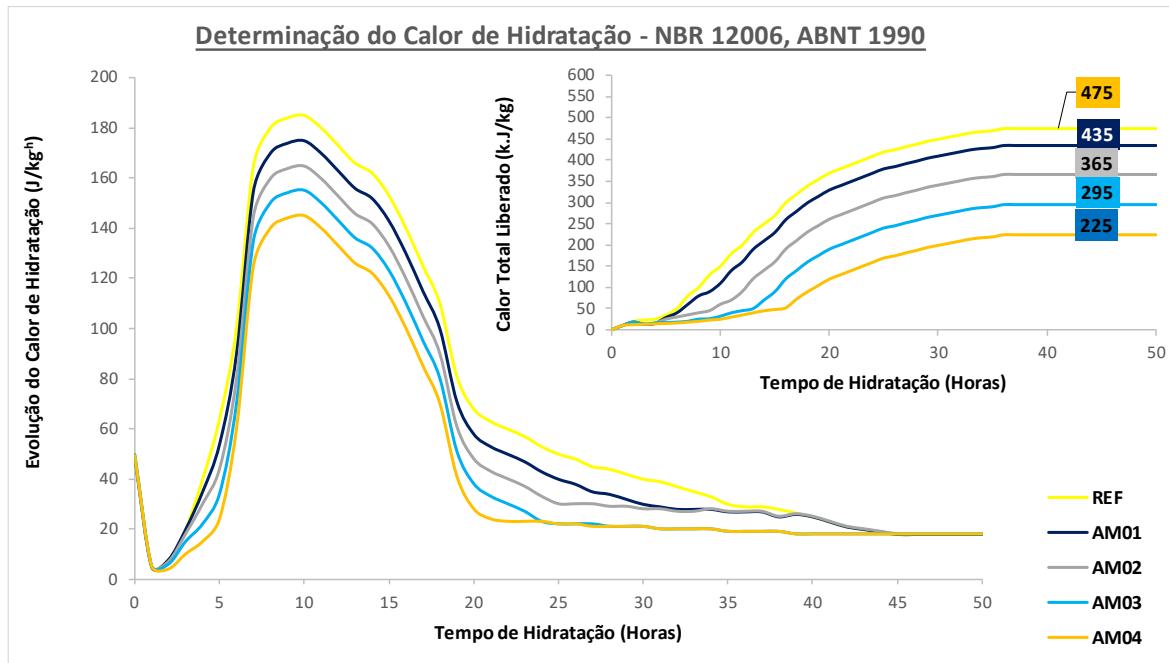
Fonte: Autora (2025)

- Determinação do calor de hidratação do cimento

O ensaio de Calor de Hidratação avalia uma propriedade física térmica do cimento: a quantidade de calor liberada durante as reações de hidratação. Embora envolva reações químicas, o que se mede de fato é um fenômeno físico que é a liberação de calor. No presente estudo, foram realizados ensaios nos cinco protótipos estudados nesta pesquisa, e os resultados estão demonstrados no gráfico contigo na Figura 4.3.1.D. Os ensaios foram

realizados com calorímetro adiabático conforme a norma NBR 12006 (ABNT 1990), no laboratório da empresa TotalMIX Controle.

Figura 4.3.1.D – Resultado do ensaio de determinação do calor de hidratação para os protótipos de Cimento Portland.



Fonte: Autora (2025)

- Perda ao Fogo

A determinação da perda ao fogo nas misturas analisadas foi realizada conforme o método estabelecido pela NBR NM 18 (ABNT, 2012). Nesse procedimento, uma porção reduzida de cimento é colocada em um cadiño e submetida ao aquecimento em uma mufla, a uma temperatura de 950 °C, durante cerca de 15 minutos. Após esse processo, a amostra é transferida para um dessecador, onde permanece até atingir massa constante, momento em que é pesada. A redução da massa inicial está associada à liberação de dióxido de carbono (CO₂), oriundo da decomposição do calcário, e da evaporação da água presente no gesso. Alterações no percentual da perda ao fogo podem indicar o grau de hidratação do cimento, sendo valores mais elevados um indicativo de maior hidratação (CUNHA, 2022).

Tabela 4.3.2.E – Tabela com o resultado do ensaio de Perda ao Fogo

Perda ao Fogo				
NBR NM 18 (ABNT, 2012)				
REF	AM01	AM02	AM03	AM04
1,99	1,67	1,24	1,37	1,77

Fonte: Autora (2025)

4.3.3 Resistência a compressão axial

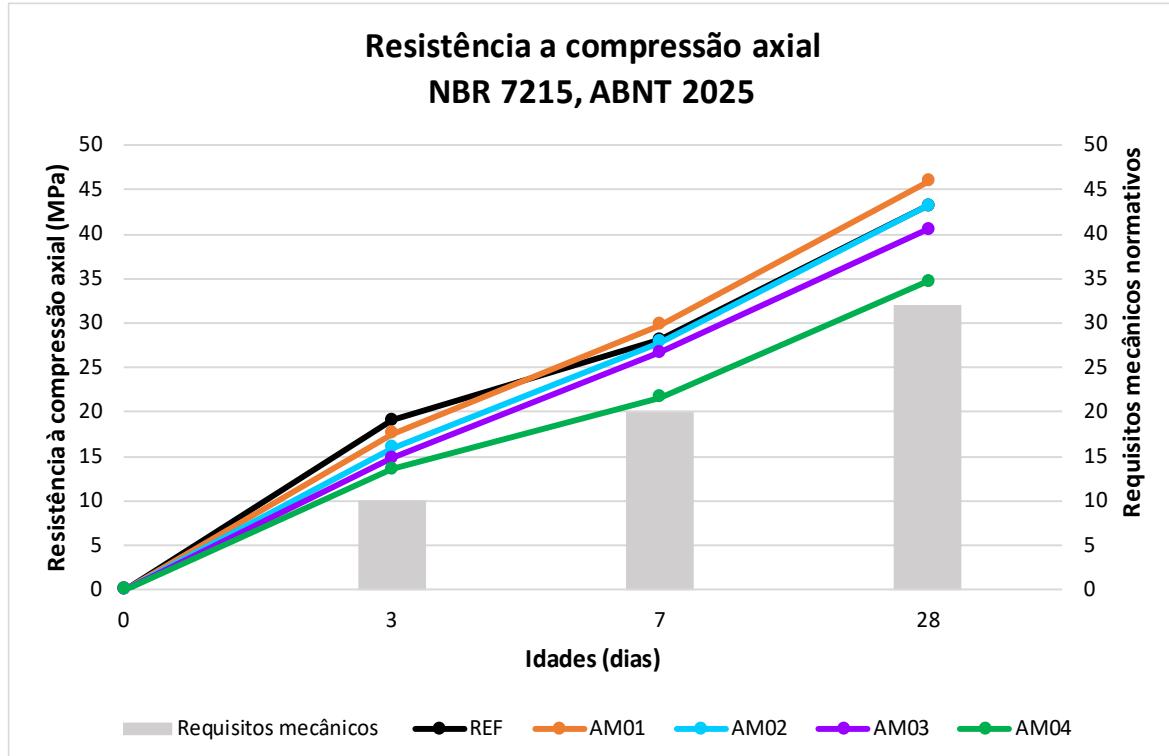
Os resultados dos ensaios de resistência a compressão axial estão inseridos na Tabela 4.3.3, e também na Figura 4.3.3, que mostra o graficamente o resultado, fazendo comparações aos limites normativos por idade (dispostos em gráficos de barra), e também aos protótipos entre si (dispostos em gráficos de linhas). Os ensaios foram realizados conforme a norma NBR 7215 (ABNT 2025). Estes ensaios foram realizados no laboratório da empresa TotalMIX Controle.

Tabela 4.3.3 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão axial

Resistência a Compressão Axial					
NBR 7215 (ABNT 2025)					
Protótipo	Percentual de Escória (%)	Idades			
		03 DIAS (MPa) Limite normativo CPIII ≥ 10MPa	07 DIAS (MPa) Limite normativo CPIII ≥ 20MPa	28 DIAS (MPa) Limite normativo CPIII ≥ 32MPa	
REF	35	19,00	28,10	43,20	
AM01	45	17,52	29,80	45,90	
AM02	55	15,98	27,82	43,14	
AM03	65	14,79	26,63	40,55	
AM04	75	13,54	21,60	34,62	

Fonte: Autora (2025)

Figura 4.3.3 – Gráfico do ensaio de resistência a compressão axial



Fonte: Autora (2025)

4.3.4 Avaliação da reação álcali agregado

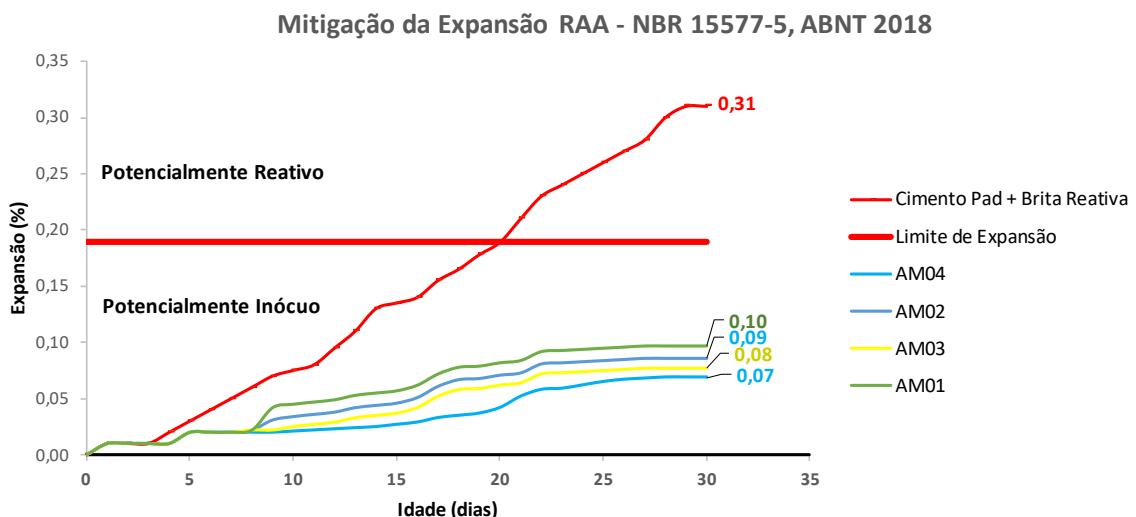
A avaliação da mitigação da reação álcali-agregado (RAA), avaliada segundo os procedimentos da NBR 15577-5, ABNT 2018, teve como objetivo verificar a eficiência da adição minerais/escoria de gusa na redução da expansão potencial em sistemas cimento-agregado. O método permitiu identificar o comportamento expansivo dos materiais ao longo do tempo, possibilitando comparar diferentes formulações e determinar a capacidade de cada composição em mitigar os efeitos deletérios associados à RAA.

Nesta análise, foram analisados os cinco protótipos: REF, AM01, AM02, AM03 e AM04. Formulados com distintos percentuais de clínquer, gipsita, escória granulada de alto-forno, material pozolânico e material carbonático. Cada composição foi moldada e submetida ao ensaio acelerado de expansão, executado no laboratório da TotalMIX Controle Tecnológico, seguindo rigorosamente os requisitos normativos.

Os resultados obtidos, apresentados no gráfico da Figura 4.3.4, evidenciaram diferenças significativas no desempenho entre os protótipos. O protótipo de referência (REF), com maior teor de clínquer e ausência de adições mitigadoras, apresentou as maiores tendências de expansão, comportamento esperado devido ao maior aporte de álcalis disponíveis no sistema. Por outro lado, os protótipos AM01, AM02, AM03 e AM04, formulados com percentuais progressivamente maiores de escória granulada de alto-forno e material pozolânico, componentes reconhecidos pela capacidade de consumir hidróxido de cálcio e reduzir a alcalinidade da solução intersticial, demonstraram desempenho superior na mitigação da expansão.

A análise comparativa mostrou que a incorporação de adições minerais aumentou a estabilidade dimensional do material, sendo possível observar uma redução gradativa da expansão proporcional ao aumento do teor de escória e materiais pozolânicos. Esse comportamento confirmou a eficácia técnica dessas adições na mitigação da RAA, em consonância com os mecanismos previstos na literatura e respaldados pelos critérios da ABNT NBR 15577.

Figura 4.3.4 – Gráfico do ensaio de RAA



Fonte: Autora (2025)

4.3.5 Avaliação de absorção de água

- Absorção por capilaridade

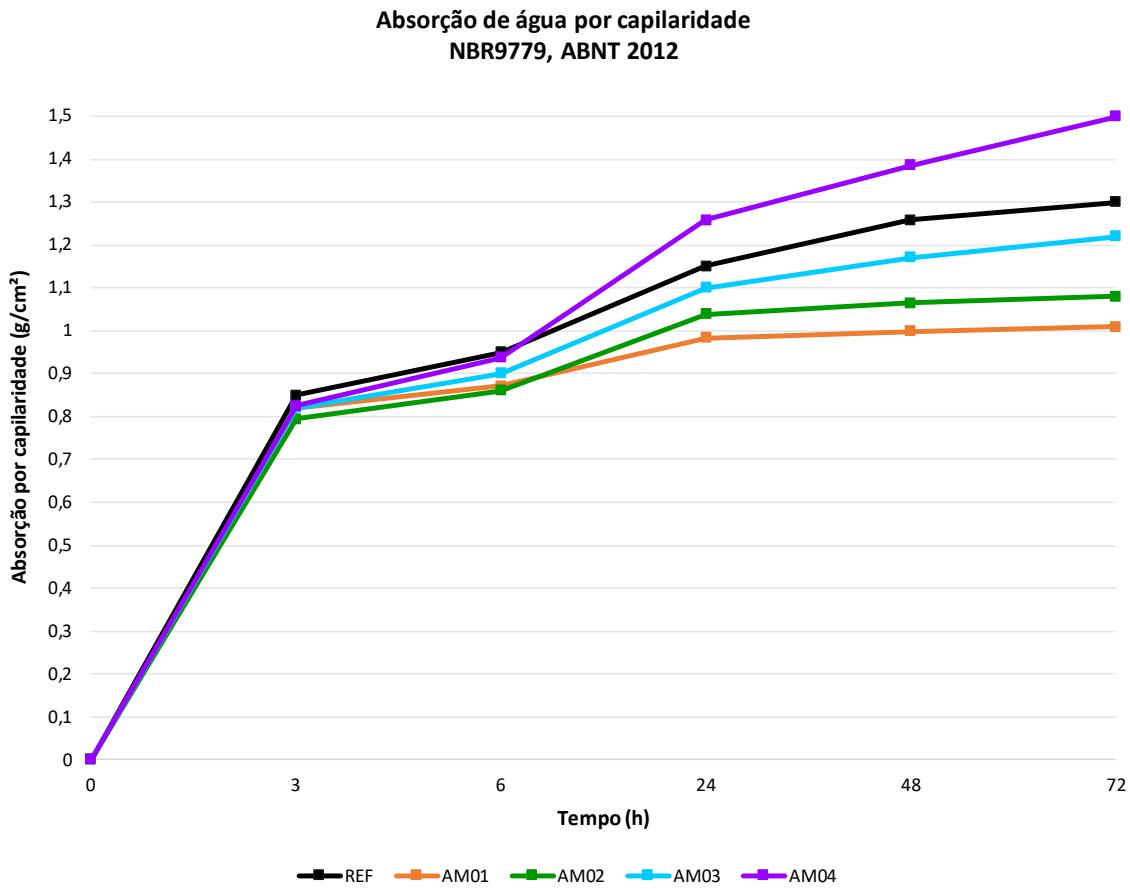
Foram realizados ensaios de absorção por capilaridade nas amostras de protótipos, no laboratório da empresa TotalMIX Controle, de acordo com a norma NBR 9779 (ABNT 2012). Os referidos resultados, estão descritos na Tabela 4.3.5.A, e no gráfico presente na Figura 4.3.5.A.

Tabela 4.3.5.A – Resultados de ensaios de absorção de água por capilaridade

Absorção de água por capilaridade (g/cm ²) NBR 9779 (ABNT 2012)					
Protótipo	Tempo				
	3h	6h	24h	48h	72h
REF	0,85	0,95	1,15	1,26	1,30
AM01	0,82	0,87	0,98	1,00	1,01
AM02	0,79	0,86	1,04	1,06	1,08
AM03	0,82	0,90	1,10	1,17	1,22
AM04	0,83	0,94	1,26	1,39	1,5

Fonte: Autora (2025)

Figura 4.3.5.A – Gráfico contendo resultados dos ensaios de capilaridade dos protótipos



Fonte: Autora (2025)

- Absorção por imersão e índice de vazios

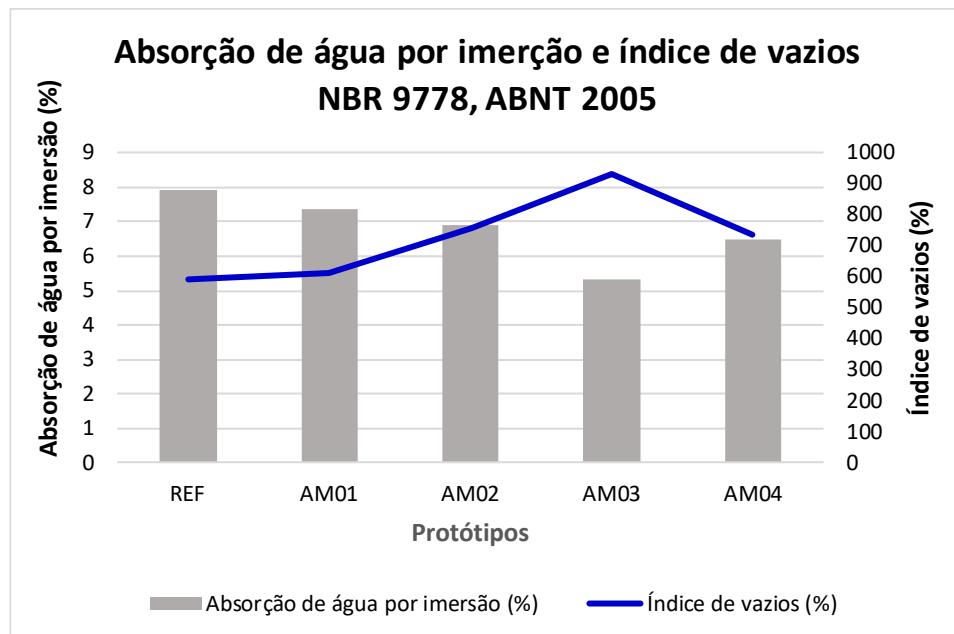
Para avaliar a absorção de água por imersão e índice de vazios, foi realizado ensaio conforme a norma NBR 9778 (ABNT 2005), para os cinco protótipos estudados nesta pesquisa. Os ensaios ocorreram no laboratório da empresa TotalMIX Controle. Os resultados foram indicados na Tabela 4.3.5.B e no gráfico presente na Figura 4.3.5.B, onde é possível comparar os dados destes ensaios para cada um dos protótipos.

Tabela 4.3.5.B – Resultados de ensaios de absorção de água por imersão e índice de vazios

Absorção de água por imersão e índice de vazios Norma: NBR 9778 (ABNT 2005)			
Protótipo	Massa Seca (g)	Absorção de água por imersão (%)	Índice de vazios (%)
REF	394	7,91	594,38
AM01	394,6	7,37	614,09
AM02	403,2	6,89	758,99
AM03	402,6	5,32	929,91
AM04	399,8	6,5	733,85

Fonte: Autora (2025)

Figura 4.3.5.B – Gráfico contendo resultados de ensaios de absorção de água por imersão e índice de vazios

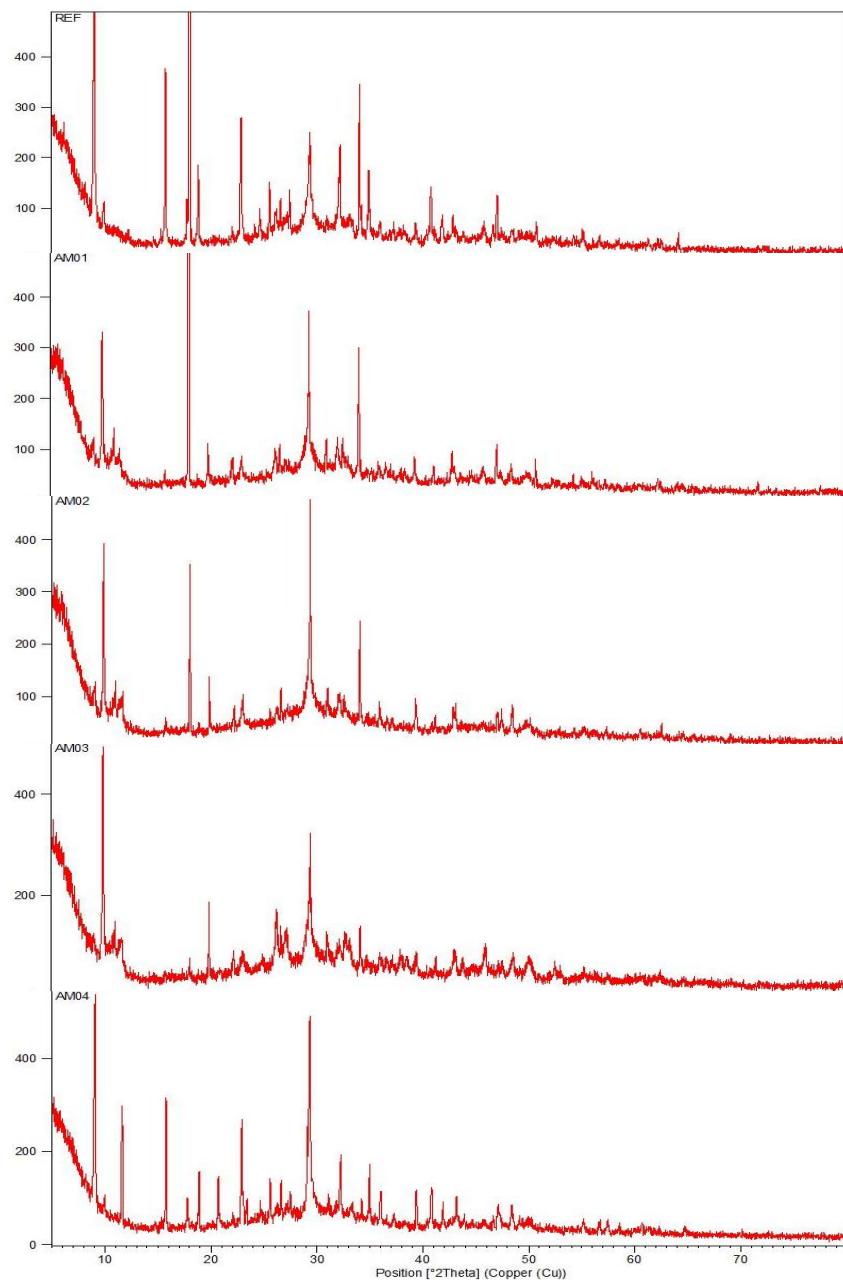


Fonte: Autora (2025)

4.3.6 Análise mineralógica

Neste estudo, as análises mineralógicas nos protótipos de cimento Portland foram realizadas através dos ensaios de fluorescência de raios X (FRX). Estes ensaios foram realizados no CRTI/UFG e estão descritos graficamente na Figura 4.3.6.

Figura 4.3.6 – Gráficos dos ensaios de FRX referentes aos protótipos de cimento

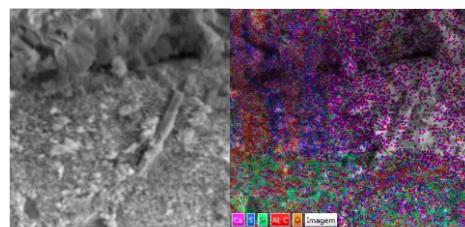


Fonte: Autora (2025)

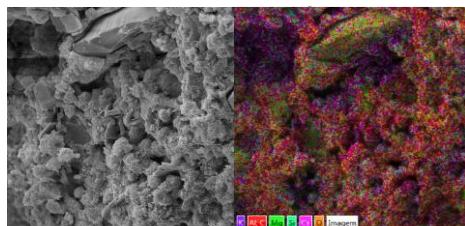
4.3.7 Análise microestrutural (MEV)

Figura 4.3.7.A – Resultados dos ensaios de MEV dos protótipos de Cimento Portland (i)

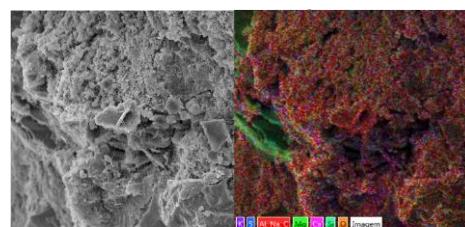
REF (ii) AM01 (iii) AM02 (iv) AM03 (v) AM04



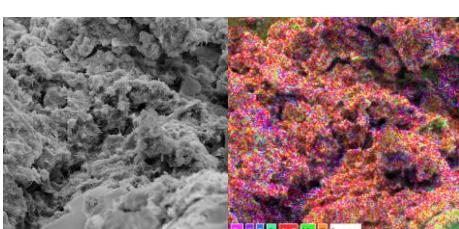
(i)



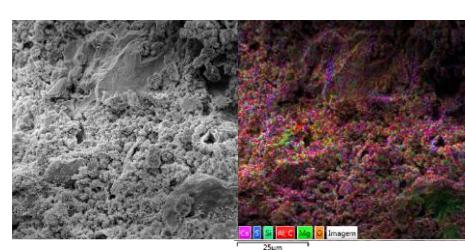
(ii)



(iii)



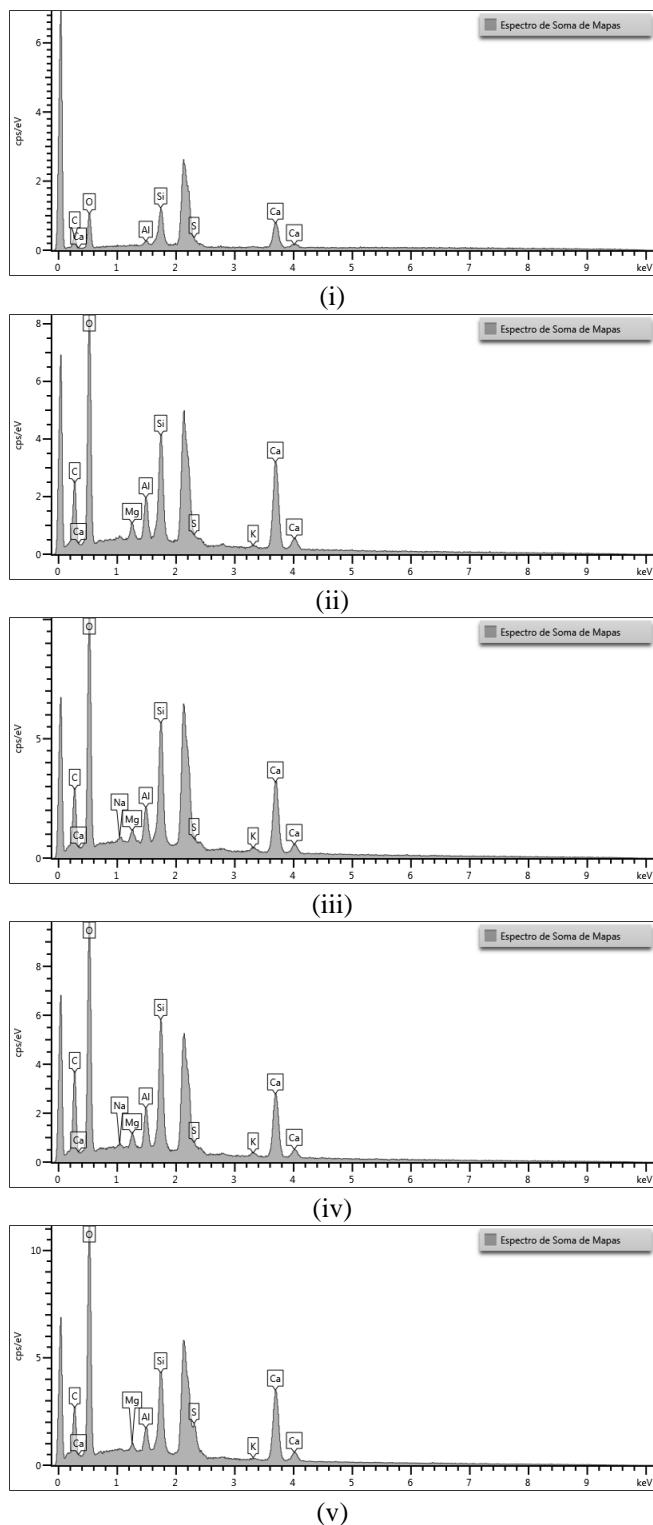
(iv)



(v)

Fonte: Autora (2025)

Figura 4.3.7.B – Resultados dos ensaios de EDS e difratograma dos protótipos de Cimento Portland (i) REF (ii) AM01 (iii) AM02 (iv) AM03 (v) AM04



Fonte: Autora (2025)

4.4 CONCLUSÕES

O ensaio do índice de consistência na pasta de cimento permitiu determinar, para cada amostra, o teor de água necessário para atingir a consistência normativa. A partir dos dados obtidos, observou-se que, quanto mais fino é o material, maior é o percentual de água requerido para a preparação da pasta. Nesse contexto, a amostra AM04 apresentou o maior teor de água de consistência, com valor correspondente a 30%.

Considerando-se esse parâmetro como referência, a amostra AM04 foi a que demandou maior percentual de água em comparação às demais amostras. As diferenças percentuais de água de consistência adicionada, em relação à AM04, foram de 30,43% para a amostra REF, 25,00% para a AM01, 7,14% para a AM02 e 3,45% para a AM03.

Verificou-se que a amostra AM04 apresentou a menor resistência à compressão aos 28 dias, entre todas as amostras analisadas. Esse resultado pode estar associado ao elevado teor de água de consistência empregado na preparação da pasta, o qual pode ter contribuído para o aumento da porosidade do compósito e, consequentemente, para a redução da resistência mecânica. A porosidade elevada da amostra AM04 foi visualizada nos resultados dos ensaios de absorção de água, como por exemplo no ensaio de capilaridade, que a AM04 foi a amostra que apresentou o maior índice de absorção de água ao final do ensaio. Essas observações quanto a porosidade a referida amostra foi confirmada por meio da análise em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), pela observação das imagens obtidas no ensaio.

Outro dado convergente foi o tempo de início e fim de pega, em que a AM04 também apresentou os maiores valores tanto de início quanto de fim de pega, o que remete a uma cinética de hidratação mais lenta. O ensaio de percentual passante na peneira nº 200 também corroborou com as análises, pois, apesar de estar dentro do limite normativo, a amostra AM04 foi a que teve maior percentual passante em relação às demais amostras. Isso leva a observar que essa amostra possui maior quantidade de finos que as demais, fato também constatado no ensaio de granulometria a laser.

Os traços analisados nesta pesquisa apresentaram presença de dióxido de silício (SiO_2), principalmente na forma de quartzo, com variações na intensidade dos picos entre as amostras. Esse composto foi recorrente e mostrou maior intensidade na amostra AM04, indicando um possível aumento no teor de escória granulada nessa formulação. O carbonato de cálcio (CaCO_3), frequentemente relacionado à presença de calcita ou componentes do clínquer, apresentou picos em todas as amostras, com maior evidência na REF e AM01. Isso sugere que essas amostras possuem maior proporção de clínquer em sua composição. Em AM03 e AM04, observou-se o aumento proporcional dos picos relacionados à sílica e redução dos elementos associados ao carbonato de cálcio, o que acompanha a tendência de substituição parcial do clínquer por escória.

De acordo com a norma NBR 16697 (ABNT 2018), o cimento CPIII 32 deve apresentar resistência à compressão axial igual ou superior a 32,0 MPa aos 28 dias. A análise dos dados evidenciou que o protótipo AM01 atingiu resistência superior aos demais protótipos, destacando-se percentualmente em relação à referência (6,25%), AM02 (6,40%), AM03 (13,19%) e AM04 (32,58%).

No que tange à composição química, a amostra AM01 revelou uma matriz com elevado teor de clínquer em sua composição, com 48,30% de CaO, essencial para a formação em alta proporção do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), e 28,86% de SiO_2 , que favorece a geração de produtos hidratados. Os teores combinados de Al_2O_3 e Fe_2O_3 , totalizando 12,07%, indicam equilíbrio adequado para a formação dos compostos C-A-H (Compostos hidratados de cálcio e alumínio) e C-F-H (Compostos hidratados de cálcio e ferro).

Elementos como MgO, K₂O e SO₃ apresentaram níveis dentro das faixas recomendadas, não interferindo negativamente no desempenho do material. Essa composição propicia a formação eficiente dos produtos hidratados, refletindo na alta resistência mecânica observada.

Em contrapartida, a amostra AM04 demonstrou o menor desempenho mecânico, após análises químicas através do ensaio de FRX, observou-se que o teor de CaO nessa

amostra é considerado baixo (1,12%), e nos leva a concluir que este acabou contribuindo em relação a disponibilidade de cálcio para a formação do C-S-H, enquanto o elevado teor de SiO₂ (70,50%) sem a presença adequada de cálcio tornou o material mais pozolânico. A concentração elevada de Al₂O₃ (15,40%), sem o cálcio necessário, possivelmente não contribuiu para a formação do C-A-H, e os baixos níveis de Fe₂O₃ e MgO reforçaram essa limitação. Consequentemente, a formação de produtos hidratados foi prejudicada, refletindo na menor resistência mecânica da amostra.

Os teores de SO₃ em todas as amostras permaneceram abaixo do limite normativo de 4,5%, indicando que não houve excesso desse componente que pudesse prejudicar o desempenho mecânico. A amostra AM01 apresentou 2,95% de SO₃, valor que favorece a formação controlada de etringita. A amostra AM04, com 3,02% de SO₃, manteve-se dentro da faixa aceitável, não alterando o cenário desfavorável causado pela baixa concentração de cálcio e o excesso de sílica.

Além disso, a amostra AM01 apresentou baixo teor de resíduos insolúveis (em relação as outras amostras analisadas no presente estudo), o que indica maior fração de componentes reativos e, consequentemente, melhor desenvolvimento da hidratação e da resistência mecânica. Já a AM04 apresentou alto índice de resíduos insolúveis 2,10% (quando comparada as outras amostras analisadas na presente pesquisa), sugerindo maior presença de materiais inertes ou impurezas, que prejudicam a formação dos produtos hidratados e reduzem a resistência final.

Quanto ao ensaio de perda ao fogo, que indica o teor de materiais voláteis ou componentes orgânicos, tais como argilas, matéria orgânica e carbonatos, observou-se correlação inversa com a resistência à compressão axial. Altos valores de perda ao fogo indicam fases instáveis e não reativas, comprometendo a formação da matriz de hidratação. Assim, quanto maior a perda ao fogo, menor a resistência mecânica do cimento, o que é tecnicamente coerente, pois materiais com maior teor de componentes voláteis formam matrizes menos densas e resistentes.

Através da análise das imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) observou-se uma elevada presença de portlandita na amostra AM01, acompanhada de baixa concentração de etringita, o que indica menor atividade pozolânica, favorecendo a formação de uma matriz mais densa e resistente. Em contraste, a amostra AM04 observou-se menor quantidade de portlandita e elevada concentração de etringita e uma microestrutura pouco mais porosa (em relação a amostra citada anteriormente), características que indicam maior reatividade pozolânica, mas também justificam sua menor resistência à compressão, devido à presença significativa tanto de vazios quanto de etringita.

Todos os protótipos desta pesquisa, demonstraram eficácia na mitigação da reação álcali-agregado (RAA), conforme os critérios da NBR 15577-5 (ABNT 2018). A substituição parcial do clínquer por escória, nos teores de 45% (AM01), 55% (AM02), 65% (AM03) e 75% (AM04), foi eficiente em reduzir a expansão, mantendo todos os protótipos abaixo do limite de 0,19% estabelecido para classificação como potencialmente inócuo. O desempenho decresce ligeiramente com o aumento do teor de escória, seguindo a ordem: AM01 > AM02 > AM03 > AM04, ainda que todos se mantenham dentro da faixa segura. O cimento padrão CPII F32 mais agregado reativo, apresentou expansão de 0,31%, caracterizando-se como potencialmente reativo e reforçando a importância do uso de adições minerais na mitigação da RAA.

Os resultados do ensaio de calor de hidratação evidenciam uma correlação entre o teor de clínquer nos protótipos e a intensidade das reações exotérmicas observadas. O pico de liberação de calor, registrado entre 8 e 12 horas, foi mais acentuado nos cimentos com maior proporção de clínquer, seguindo a ordem decrescente: REF, AM01, AM02, AM03 e AM04. Esse comportamento está associado à hidratação inicial das fases mais reativas, como a alita (C_3S). Após esse pico, houve uma queda acentuada da taxa de liberação de calor, indicando a transição para reações secundárias e posterior estabilização após 24 horas. A energia total acumulada ao final de 48 horas reforça essa tendência, com valores que variam de 475 kJ/kg (REF) a 225 kJ/kg (AM04). Essa redução progressiva no calor total liberado reflete a substituição gradual do clínquer por adições minerais menos reativas, como a

escória, sendo mais expressiva no protótipo AM04, o que está em conformidade com os objetivos de redução do fator clínquer e sustentabilidade da matriz cimentícia.

4.5 REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C125 – 16 Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates JOHN, V. M.; AGOPYAN, Vahan. Reciclagem de resíduos da construção. São Paulo, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Venda de cimento cresce 7,5% em fevereiro*. 13 mar. 2024. Disponível em: <https://abcp.org.br/venda-de-cimento-cresce-75-em-fevereiro/>. Acesso em: 18 abr. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland — Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- CBIC. **Desempenho e perspectivas da construção civil no Brasil 2025**. [Relatório]. Brasília: Câmara Brasileira da Indústria da Construção, 2024. Disponível em: <https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2024/12/final-desempenho-economico-cc-dezembro-2024.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2025.
- COSTA, Eugênio Bastos da; NOBRE, Thiago Ricardo Santos; GUERREIRO, Agenara Quatrin; MANCIO, Mauricio; KIRCHHEIM, Ana Paula. **Análise de desempenho do mercado da construção civil nos anos de 2012 a 2016 utilizando Ciência de Dados**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 7, n. 2, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/RQWhYNnvCNYDZs7sgvZvydB/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 18 abr. 2025.
- CUNHA, Guilherme Antônio Corrêa. *A importância da construção civil para a economia brasileira: a partir de uma abordagem insumo-produto*. 2022. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022. Disponível em: http://52.186.153.119/bitstream/123456789/4304/1/DISSERTACAO_GUILHERME%20ANTONIO%20CORR%c3%8aaA%20CUNHA_MESTRADO%20ECON_2022.pdf. Acesso em: 18 abr. 2025.
- CUNHA, Rodrigo Rodrigues da. **Emprego de resíduo de silício metálico como material pozolânico na produção de cimento Portland composto**. 2022. 109 f. Tese (Doutorado

em Engenharia Civil) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo. Disponível em:
<https://repositorio.ufpa.br/handle/2011/15770>. Acesso em: 18 abr 2025

DOS SANTOS PEREIRA, Sávio Aparecido; BARROS, Iury Costa; SILVA JUNIOR, Arlam Carneiro; DIAS, Diogo Gonçalves; MENDES, Thiago Augusto. **Análise de desempenho do mercado da construção civil nos anos de 2012 a 2016 utilizando ciência de dados.** *Revista Tecnia*, Goiânia, v. 7, n. 2, 2022. Disponível em:
<https://periodicos.ifg.edu.br/tecnia/article/view/96/167>. Acesso em: 18 abr. 2025.

IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.**

Genebra: IPCC, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf. Acesso em: 18 abr. 2025.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. **Supplementary cementitious materials.** *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>. Acesso em: 18 abr. 2025.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials.** 4th ed. McGraw-Hill, 2014

NAÇÕES UNIDAS. **Acordo de Paris.** [S.l.]: Nações Unidas, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-08/Acordo-de-Paris.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2025.

PAGIO, Mariana Zani; CARRARETO, Lilian Favarato; VIEIRA, Geilma Lima; MAGALHÃES, Diego Corrêa. Caracterização de resíduos siderúrgicos visando à aplicação em matrizes cimentícias. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 167-186, abr./jun. 2022.

SCRIVENER, K. L.; SNELLINGS, R. The Rise of Portland Cements. *Elements*, v. 18, p. 308-313, 2022. Disponível em: DOI: 10.2138/gselements.18.5.308. Acesso em: 18 abr. 2025.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório anual 2023.** Brasília, DF: SNIC, 2023. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/1732731328.pdf. Acesso em: 18 abr. 2025.

SINDUSCON-PA. **Boletim de análise: fevereiro 2025.** [Boletim técnico]. Belém: Sindicato da Indústria da Construção Civil do Pará, 2025. Disponível em: <https://www.sindusconpa.org.br/>. Acesso em: 18 abr. 2025.

SNIC. **História do cimento no Brasil.** [Relatório]. São Paulo: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2016. Disponível em: http://snic.org.br/assets/doc/historia_do_cimento_no_brasil.pdf. Acesso em: 18 abr. 2025.

SONG, H.-W.; SARASWATHY, V. Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—An overview. *Journal of Hazardous Materials*, v. 138, n. 2, p. 226-233, 2006. Disponível em: DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.07.022. Acesso em: 18 abr. 2025.

WORRELL et al. Carbon Dioxide Emissions From the Global Cement Industry. *Annual Review Energy and the Environment*, v. 26, n. 1, p. 303 29, 2001.

ZUNINO, F.; SCRIVENER, K. **Reactivity of kaolinitic clays calcined in the 650 °C–1050 °C temperature range: Towards a robust assessment of overcalcination.** *Cement and Concrete Composites*, v. 146, 105380, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105380>. Acesso

5. CONCLUSÕES GERAIS

Esta pesquisa teve como objetivo geral produzir e avaliar cimentos Portland de alto-forno com resistência à compressão de 32 MPa, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018), por meio da variação nas proporções de clínquer e escória granulada de alto-forno. Para isso, foram desenvolvidos dois estudos complementares: a caracterização do material cimentício suplementar e a formulação de cimentos com diferentes teores de substituição.

Os resultados obtidos confirmaram a viabilidade técnica da escória beneficiada como substituto parcial do clínquer, evidenciada pela sua reatividade, estabilidade química e adequação físico-mineralógica. A formulação dos protótipos demonstrou que a substituição de até 55% do clínquer por escória resultou em cimentos com bom desempenho mecânico,

adequação às normas técnicas e redução significativa na liberação de calor e potencial de reação álcali-agregado.

Adicionalmente, os testes comprovaram que teores mais elevados de escória impactam negativamente a resistência mecânica e a densidade da matriz, sobretudo pela maior demanda de água e aumento da porosidade. Ainda assim, todas as composições mantiveram-se dentro dos parâmetros normativos e apresentaram desempenho técnico satisfatório.

Considerando os aspectos ambientais, técnicos e de disponibilidade regional de matérias-primas, conclui-se que a produção de cimento CP III-E 32 com redução do teor de clínquer é viável na região Oeste do Maranhão, contribuindo para a mitigação das emissões de CO₂ e promovendo o uso sustentável de subprodutos industriais.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para ampliar o entendimento sobre o desempenho dos cimentos estudados, recomenda-se que trabalhos futuros incluam avaliações de durabilidade envolvendo as formulações obtidas com diferentes teores de escória granulada de alto-forno. Essas análises permitirão verificar o comportamento do material em condições de exposição prolongada e em ambientes com agentes que podem influenciar sua estabilidade ao longo do tempo.

Além disso, recomenda-se que essas investigações sejam associadas a análises complementares de longo prazo, de modo a observar a evolução das propriedades ao longo da vida útil do material. A incorporação dessas abordagens em estudos futuros contribuirá para consolidar o conhecimento sobre o comportamento dos cimentos CP III produzidos com matérias-primas regionais e para apoiar decisões relacionadas à sua aplicação em diferentes contextos construtivos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PICANÇO, Marcelo de Souza. **Arenito zeolítico com propriedades pozolânicas adicionadas ao cimento Portland.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/9346>. Acesso em: 2 abr. 2025.

PAGIO, M. Z.; CARRARETO, L. F.; VIEIRA, G. L.; MAGALHÃES, D. C. Caracterização de resíduos siderúrgicos visando à aplicação em matrizes cimentícias. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 167–186, abr./jun. 2022. ISSN 1678-8621. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/KspPYXwzT3rhSBRRkM6PLNH/?lang=pt>. Acesso em: 2 abr. 2025. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000200599>.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Relatório Anual SNIC 2023. [S. l.]: SNIC, 2023. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/1732731328.pdf. Acesso em: 2 abr. 2025.

SINDUSCON-PA – Sindicato da Indústria da Construção do Estado do Pará. Relatório Anual 2025. [S. l.]: SINDUSCON-PA, 2025. Disponível em: <https://www.sindusconpa.org.br/>. Acesso em: 2 abr. 2025.

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Site institucional. Disponível em: <https://cbic.org.br/>. Acesso em: 2 abr. 2025.

Rodrigues, M., & Silva, P. (2022). **Impact of production methods on energy consumption in cement manufacturing.** Energy Reports, 10(6), 1456-1467. doi:10.1016/j.egyr.2022.04.001.

PEREIRA, J. M.; COSTA, E. A.; FERREIRA, R. C. Emissões de CO2 na produção de cimento Portland: impactos e estratégias de mitigação. Journal of Environmental Management, v. 13, n. 2, p. 45-60, 2020.

OLIVEIRA, M. L.; SANTOS, D. P.; FIGUEIREDO, H. C. Utilização de resíduos industriais em concretos: uma análise das alternativas sustentáveis. *Construction Materials Journal*, v. 8, n. 3, p. 87-101, 2022.

ARRUDA JUNIOR, Euler Santos; BARATA, Márcio Santos. Cimento de baixo impacto ambiental a partir dos resíduos cauliníticos da Amazônia. **Matéria (UFRJ)**, v. 27, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/VwtnYzLF3fLbQsKDZ5g3VsH/?lang=pt>. Acesso em: 5 maio 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2021-46434>.

MARTINS, Ana Carolina Pereira et al. Steel slags in cement-based composites: An ultimate review on characterization, applications and performance. **Construction and Building Materials**, v. 291, 12 jul. 2021, 123265. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123265>.

SANTOS, Jéssica Rodrigues dos; OLIVEIRA, Andrielli Moraes de; CASCUDO, Oswaldo. Estudo das propriedades no estado fresco e endurecido de concretos com adições minerais. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 8, n. 3, 2024. ISSN 2525-4251. Disponível em: <http://revistas.poli.br/index.php/repa/article/view/2174>. Acesso em: 5 maio 2025. DOI: <https://doi.org/10.25286/repa.v8i3.2174>.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. ISBN 978-8582600719.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **As vendas de cimento em março de 2025 somaram 5,5 milhões de toneladas.** 2025. Disponível em: [http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=106#:~:text=As%20vendas%20de%20cimento%20em,Ind%C3%A3stria%20de%20Cimento%20\(SNIC\)](http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=106#:~:text=As%20vendas%20de%20cimento%20em,Ind%C3%A3stria%20de%20Cimento%20(SNIC)). Acesso em: 1 maio 2025.

ALVES, Marlos Romero. **O efeito do uso de altas dosagens de escória de alto forno na hidratação do cimento Portland.** 2024. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)

– Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Tudo sobre cimento: da matéria-prima ao cimento Portland**. São Paulo: ABCP, 2002. 84 p. Disponível em: <https://www.abcp.org.br>. Acesso em: 5 jun. 2025.

BARBOSA, M. T. G. Análise crítica de materiais alternativos empregados na construção civil. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 2004, Argentina. Anais... Argentina, 2004.

BUREAU OF MINES. **Slag - Iron and Steel. Indian Minerals Yearbook 2018** (Part II: Metals and Alloys). 57. ed. Nagpur: Ministry of Mines, Government of India, 2018. Disponível em: www.ibm.gov.in. Acesso em: 29 mar. 2025.

MANCINI, A. et al. **Iron speciation in blast furnace slag cements**. Cement and Concrete Research, v. 140, p. 106287, 2021. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106287.

VELTEN, R. Z. et al. **Caracterização mecânica de misturas solo-escória de alto-forno granulada moída para aplicações em estradas florestais**. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 30, n. 2, p. 235-240, 2006.

ZOU, J.; LIU, Z.; GUO, Q. **Comprehensive utilisation of blast furnace slag**. Canadian Metallurgical Quarterly, v. 63, n. 3, p. 927-934, 2024. DOI: 10.1080/00084433.2023.2235147.

SCRIVENER, K. L.; HALL, C. Oilwell cement clinkers: X-ray microanalysis and phase composition. **Advanced Cement Based Materials**, v. 7, n. 1, p. 28–38, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)00035-7](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)00035-7).

MA, S. et al. Alite-ye'elimit clinker: hydration kinetics, products and microstructure. **Construction and Building Materials**, v. 266, p. 121062, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121062>.



IOSR Journals

International Organization
of Scientific Research

Australia | Qatar | India | New York | Malaysia

Certificate

Office Code :	M1867	Date :	2025-05-06
MIC No. :	2854	Status :	Published

Article Details

This is to certify that following paper has been published in IOSR Journals.

Article Title	:	Characterization of the by product Blast Furnace Slag before its application in the manufacture of Blast Furnace Portland Cement
Author's Name	:	Caroline Vieira Marcal, Rodrigo Rodrigues Da Cunha, Marcelo De Souza Picanco, Alcebiades Negrao Macedo
Journal Name	:	IOSR Journal of Business and Management
ISSN	:	2278-487X
Publisher Name	:	International Organization of Scientific Research
Journal Url	:	www.iosrjournals.org
Publishing Model	:	Open Access Publishing
Review Type	:	Blind Peer Review Process
Journal Type	:	Indexed Refereed Journal
Volume No.	:	27
Issue No.	:	05
Article DOI	:	10.9790/487X-2705030112



Signature
Editorial Manager
IOSR Journals
support@iosrmail.org

Characterization of the by-product Blast Furnace Slag before its application in the manufacture of Blast Furnace Portland Cement

Caroline Vieira Marçal¹, Rodrigo Rodrigues da Cunha², Marcelo de Souza Picanço¹, Alcebíades Negrão Macêdo¹

¹(Institute Of Technology, Graduate Program In Civil Engineering, Federal University Of Pará, Brazil)

²(Federal Institute of Education, Science and Technology of Pará, Brazil)

Abstract:

Background: The cement industry is a significant contributor to greenhouse gas emissions. In 2022, Brazil emitted approximately 580 kg of CO₂ per ton of cement produced, slightly below the global average of 608 kg/t (SNIC, 2023). Initiatives like the Roadmap Net Zero aim to achieve carbon neutrality in the sector by 2050 (SNIC, 2023), driving the need for sustainable alternatives. A promising solution is the partial replacement of clinker with supplementary cementitious materials, such as granulated blast furnace slag (GBFS). This study focuses on characterizing GBFS from a steel plant in western Maranhão, Brazil, to assess its suitability for producing blast furnace Portland cement (CP III-E 32) according to the NBR 16697 standard (ABNT, 2018).

Materials and Methods: We subjected the slag, a byproduct of pig iron production, to physical, chemical, mineralogical, and environmental analyses. These tests evaluated its compatibility with clinker and gypsum in cement formulations. We followed standardized protocols to determine particle size distribution, chemical composition (via XRF), mineral phases (XRD), and pozzolanic activity. The results were compared with the requirements for CP III-E 32 cement.

Results: The characterized slag exhibited favorable properties, including high amorphous content (indicating reactivity) and chemical composition within the limits for GBFS (CaO/SiO₂ ratio ~1.2, Al₂O₃ ~12%). Pozzolanic activity index exceeded 75% at 28 days, meeting normative criteria. Environmental tests confirmed low heavy metal leaching potential. These findings support its use as a clinker substitute in proportions up to 50% for CP III-E 32 production.

Conclusion: The blast furnace slag from Maranhão demonstrated technical viability for producing sustainable cement, reducing clinker content without compromising performance. This approach aligns with global decarbonization goals, offering a practical pathway to lower CO₂ emissions in the construction sector.

Key Word: Blast Furnace Slag; Supplementary Cementitious Materials; Clinker; Portland Cement; Carbon Emissions.

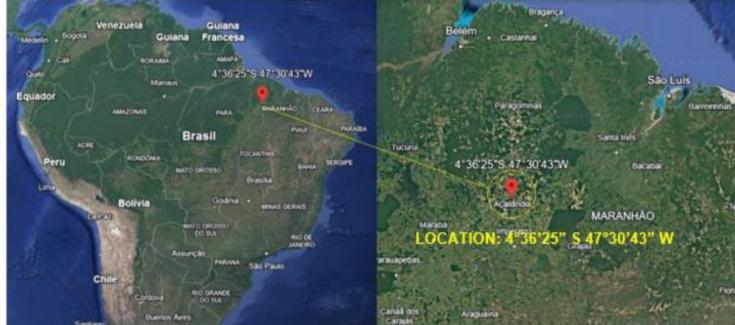
I. Introduction

Blast Furnace Slag (BFS), a byproduct of pig iron production, is the focus of this study. It originates from a steel plant located in Açaílândia, Maranhão, Brazil, which is part of an expanding industrial hub driven by mining and steel production. According to Almeida Júnior et al. (2024), mining in the region began in the 1980s, with five industries stimulated by iron extraction in the Carajás Mountains, located 371 km away. The studied plant is situated in Açaílândia (Figure 1), 4.3 km from BR-222 highway, playing a key role in the production and utilization of this byproduct.

Consequently, Açaílândia serves as a multimodal integration hub, connecting railway, road, and port systems, facilitating industrial output flow. Its strategic location, approximately 560 km from the Port of Itaqui—one of Brazil's largest ports—ensures efficient export and import operations, reinforcing its importance in the national logistics landscape.

Regarding road infrastructure, Açaílândia benefits from two major connections. The BR-222 links the municipality to western Maranhão, connecting strategic areas for regional development. Simultaneously, the BR-010, known as the Belém-Brasília Highway, crosses the city and enables efficient cargo transportation to various regions of the country.

Figure 1: Map showing the collection location of the Blast Furnace Slag byproduct



Source: Adapted from Google Earth, 2025

II. Material And Methods

2.1 Materials

Blast Furnace Slag (BFS) is a byproduct generated during pig iron production in steelmaking units called blast furnaces. The process begins with charging the blast furnace with iron ore, coke, and fluxes such as limestone and dolomite. The burning coke reaches temperatures exceeding 1500°C, promoting ore melting and impurity separation. Reactions between fluxes and impurities result in liquid slag formation, which floats on molten pig iron due to its lower density (THOMAZ, 2012; PIMENTEL et al., 2017).

After separation, molten iron is directed to molds for steel production while slag is transferred to large containers and subsequently poured. Slag cooling follows distinct techniques that determine its properties. Rapid cooling with water jets produces granulated slag (Figure 2), while slow air cooling yields crystallized slag (THOMAZ, 2012).

Figure 2 : BFS cooling with high-pressure water jets



Source: Adapted from CVB, 2024; THOMAZ, 2012

Although BFS chemical composition remains unchanged after cooling, its physical properties and reactivity vary according to the cooling process. Rapidly cooled granulated slag exhibits a glassy, amorphous structure with high reactivity, unlike crystallized slag. These characteristics make granulated blast furnace slag widely recognized as suitable for cement compositions (DINA, 2014; ÖZBAY et al., 2016; Liu et al., 2024).

The chemical composition of BFS, though subject to variations depending on raw materials and furnace operating conditions, consists predominantly of calcium oxide, silicon dioxide, aluminum oxide, and magnesium oxide (Gomes, Tavares & Correa, 2020). Furthermore, this slag can be classified as acidic or basic depending on its oxide ratios. Acidic BFS shows silica oxide (SiO_2) predominance over calcium oxide (CaO), resulting in lower alkaline reactivity and restricted cement applications. In contrast, basic BFS with higher calcium oxide concentration demonstrates elevated reactivity, making it widely used in the cement industry (Ahmad et al., 2022).

According to the Indian Bureau of Mines (2018), slag quantities generated during pig iron and steel production vary substantially, being primarily influenced by raw material composition and furnace type. Typically, with iron ore grades between 60-65%, blast furnace slag production ranges from 300-540 kg per ton of pig iron. In

Caroline Vieira Marçal

2 | Page

steelmaking, slag generation is approximately 150-200 kg per ton of liquid steel. For lower-grade ores, slag production can reach up to one ton per ton of pig iron. Proportionally, steel slag represents about 20-30% of the country's crude steel production mass.

Blast Furnace Slag plays a fundamental role in construction, being used not only in cement production but also as paving aggregate and concrete component. In cement manufacturing, its application as partial Portland clinker substitute is strategic, preserving natural resources while significantly reducing CO₂ emissions - construction's major environmental impact contributor. According to Mancini et al. (2021), partial clinker replacement with supplementary materials like pozzolans, calcined clays, and industrial byproducts (including fly ash and ground granulated blast furnace slag) constitutes an efficient approach to mitigate environmental impacts without compromising mechanical performance or durability. The following materials were employed in this research:

- **Clinker**

The clinker used was provided by a cement plant located in Açaílândia, Maranhão state, Brazil. This material was specifically supplied for the purposes of the present study.

- **Gypsum**

The gypsum (hydrated calcium sulfate) utilized was also furnished by the aforementioned cement plant, reinforcing the technical-scientific partnership established for this investigation.

- **Blast Furnace Slag (BFS)**

Similarly to the materials described above (clinker and gypsum), the blast furnace slag was likewise supplied by the cement plant in Açaílândia, MA. It should be noted that all materials used in this study are routinely employed by this company in the production of CP III-type cement.

2.2 Methods

For the characterization of the blast furnace slag (BFS) used in this research, tests were conducted on samples in two conditions: "Raw" BFS (as collected directly from the factory) and Processed BFS (treated by the author at UFPA's laboratory).

We performed tests on raw BFS according to the standards specified in Table 1 while the analyses conducted after the slag grinding and sieving process adhered to the norms presented in Table 2.

Table 1 : Standards used for characterization tests of raw BFS

Standards for Blast Furnace Slag Characterization ("Raw Condition")		
Characterization	Test	Method
Physical	Particle size distribution	NBR 17054 (ABNT, 2022)
	Specific gravity determination	NBR 16917 (ABNT, 2021)
Pozzolanic activity evaluation	Pozzolanic Activity Index (PAI) with cement	NBR 5752 (ABNT, 2014)
	Pozzolanic Activity Index (PAI) with lime	NBR 5751 (ABNT, 2015)

Source: Author, 2025

Table 2 : Standards Used in Characterization Tests of BFS After Grinding

Standards for Characterization of Processed Blast Furnace Slag		
Characterization	Test	Method
Physical	Fineness (Blaine method)	NBR 16372 (ABNT, 2015)
	Consistency index	NBR 13276 (ABNT, 2016)
	Specific gravity	NBR NM 23 (ABNT, 2000)
	Laser granulometry	Internal procedure
Chemical	X-ray fluorescence spectrometry (XRF)	NBR 14656 (ABNT, 2023)
	Hydraulicity	NBR 16697 (ABNT, 2018)
Pozzolanic Activity Evaluation	Pozzolanic Activity Index (PAI) with lime	NBR 5751 (ABNT, 2015)
	Pozzolanic Activity Index (PAI) with cement	NBR 5752 (ABNT, 2014)
Mineralogical	X-ray diffraction (XRD)	Internal procedure
Environmental	Leaching tests	NBR 10005 (ABNT, 2004)
	Solubility tests	NBR 10006 (ABNT, 2004)
	Waste classification	NBR 10004 (ABNT, 2004), Annex F

Source: Author, 2025

Caroline Vicira Marçal

3 | Page

III. Result

Sample Preparation

The characterization process of the blast furnace slag (BFS) used in this research was divided into two stages. Initially, samples were separated for testing both in the "raw" condition (Figure 3) and processed condition (Figure 4). The processed BFS refers to a sample that underwent laboratory treatment to acquire the necessary characteristics for use as a supplementary cementitious material in the CP III cement analyzed in this study.

Figure 3 : Raw blast furnace slag



Source: Author, 2025

Figure 4 : Processed Blast Furnace Slag



Source: Author, 2025

We initiated the beneficiation process by dry grinding the slag at the Experimental Laboratory of Construction Materials (LEMAC) of UFPA. A ball mill was used, equipped with a porcelain jar and balls, brand EMIC, operating at 12 rpm with a capacity of 7 liters (Figure 3.3.C). After grinding, the material had a powdery appearance and was sent to the next stage of beneficiation. This subsequent stage was also conducted at LEMAC and consisted of sieving the ground material using a No. 200 mesh sieve (75 µm).

Figure 5 : Ball mill equipment belonging to the LEMAC/UFPA laboratory



Source: Author, 2025

In addition to EAF slag, the clinker and gypsum used in the formulation of the aforementioned cement were also subjected to the same beneficiation procedure. The equipment rotation speed remained at 12 rpm for all materials. The grinding media load also remained the same, consisting of 5 kg of balls for every 1 kg of material, with the proportion divided into 2/3 small balls and 1/3 large balls (BARROS, 2025). However, the grinding times varied for each material:

- **Clinker**

For the grinding of clinker, a time of 3 hours was established. This duration was sufficient to reach the desired particle size distribution, that is, particles with a diameter equal to or smaller than that of cement, passing through the 75 µm sieve, as described by Farias et al. (2023).

- **Gypsum**

For the grinding of gypsum, a time of 30 minutes was used, as suggested by Farias et al. (2023), who indicated that this duration was sufficient to achieve the desired fineness suitable for use in cement formulation.

- **Granulated blast furnace slag**

The grinding time adopted for the granulated blast furnace slag was also 3 hours, based on the study by Farias et al. (2023), which showed that this duration was sufficient for the material to reach a particle size equal to or smaller than that of Portland cement.

3.1 Characterization of Raw EAF Slag

3.1.1 Physical Characterization

- **Particle Size Distribution**

In this study, slag sourced from an industry located in the state of Maranhão was used. After collecting the material, we conducted characterization tests on the raw EAF slag. One of the first tests was the determination of the particle size distribution, carried out at the laboratory of the Federal Institute of Pará – Belém Campus. We conducted the test according to the criteria established by the NBR 17054 standard (ABNT, 2022), and the results are presented in Table 3.

Table 3: Particle Size Distribution Test of Raw EAF Slag

Granulometric Composition of Raw EAF Slag						
Sieve Opening (mm)	Retained Mass (g)	Retained Percentage (%)	Cumulative Percentage (%)	Passing Percentage (%)	Maximum Diameter (mm)	Fineness Modulus
6.3	5.78	0.39	0.39	99.61		
4.75	22.11	1.48	1.87	98.13		
2.36	175.73	11.78	13.64	86.36		
2.00	100.29	6.72	20.37	79.63	6.3	2.08
0.60	845.15	56.63	77.00	23.00		
0.15	275.00	18.43	95.43	4.57		
Pan (Bottom)	68.23	4.57	100.00	0.00		

Source: Author, 2025

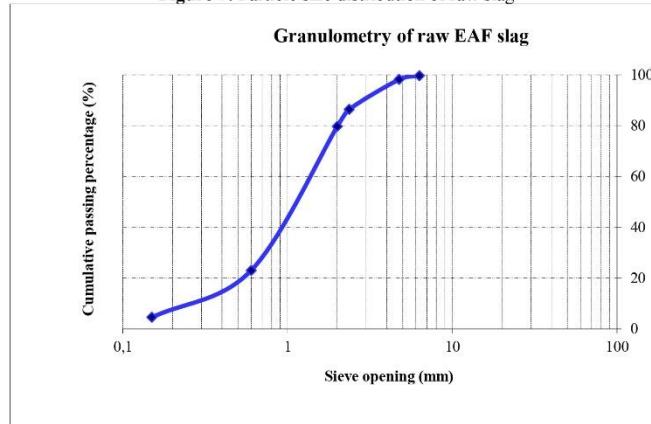
After the aforementioned data collection, it was possible to generate a graph using the information from the test, allowing for a better analysis of whether the particle size distribution of the raw EAF slag is uniform, as illustrated in Figure 7 and in the photograph shown in Figure 6.

Figure 6: Particle size distribution test of raw EAF slag



Source: Author, 2025

Figure 7: Particle size distribution of raw slag



Source: Author, 2025

Caroline Vieira Marçal

Based on the experimental results obtained in the laboratory, presented in Table 3, the fineness modulus of the slag sample was calculated in accordance with the criteria established by the NBR 17054 standard (ABNT, 2022). It was also possible to determine the maximum particle diameter of the sample. The measured data indicate that the slag analyzed in this study has a fineness modulus of 2.08 and a maximum diameter of 6.30 mm.

- **Determination of Specific Gravity**

To determine the specific gravity of the raw EAF slag, the NBR 16917 standard (ABNT, 2021) was used. The test was conducted at the laboratory of the Federal Institute of Pará, and the specific gravity was determined to be 2.54 g/cm³ for the raw EAF slag.

3.1.2 Evaluation of Pozzolanic Activity

- **Pozzolanic Activity Index (PAI) with Lime**

We performed the Pozzolanic Activity Index (PAI) test with lime following the procedures established by the NBR 5751 standard (ABNT, 2015), at the laboratory of the Federal Institute of Pará. The main objective was to verify whether the studied blast furnace slag, in its raw state, shows reactivity with calcium hydroxide, which could indicate the occurrence of secondary reactions during the cement hydration process.

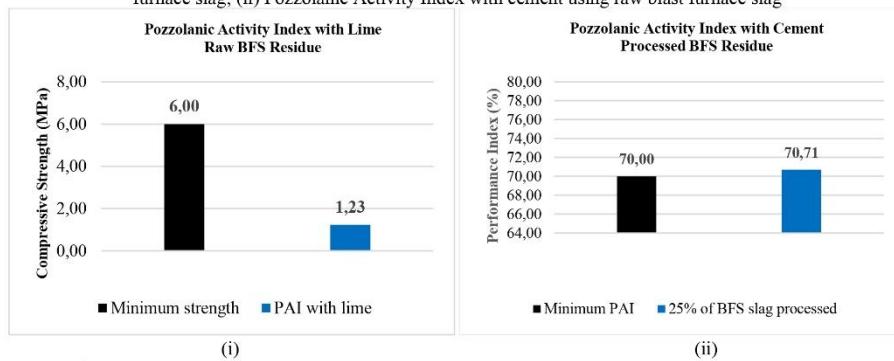
As illustrated in the graph shown in Figure 8, it can be observed that the minimum strength required by the standard, 6.00 MPa, was not achieved. The raw EAF slag sample showed an axial compressive strength of only 1.23 MPa, indicating the absence of significant pozzolanic activity in its raw form.

- **Pozzolanic Activity Index (PAI) with Cement**

The PAI test with cement was conducted following the parameters of the NBR 5752 standard (ABNT, 2014), and carried out at the laboratory of the Federal Institute of Pará. The purpose of this test is to assess the mechanical performance index at 28 days, that is, to determine whether the analyzed material contributes to strength gain at 28 days in the tested mixture.

As shown in the graph in Figure 8, in the PAI test with cement, the raw EAF slag sample also did not meet the normative requirements. The average compressive strength obtained was 45.67 MPa, corresponding to approximately 65.24% of the minimum strength required by the standard, which is 70 MPa.

Figure 8: Graphs showing pozzolanic activity test results: (i) Pozzolanic Activity Index with lime using raw blast furnace slag; (ii) Pozzolanic Activity Index with cement using raw blast furnace slag



Source: Author, 2025

3.2 Characterization of Processed EAF Slag

3.2.1 Physical Characterization

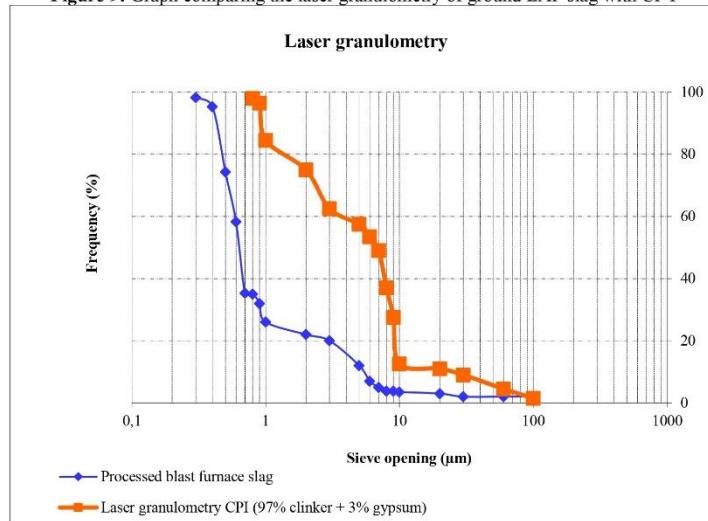
- **Specific Gravity**

The specific gravity test was conducted according to NBR NM 23 (ABNT, 2000) at the laboratory of the Federal Institute of Pará, Belém Campus. In this test, the specific gravity of the processed EAF slag was determined to be 3.33 g/cm³.

- **Laser Granulometry**

This test was carried out at the laboratory of a cement factory located in Currais Novos, Rio Grande do Norte. Figure 9 presents a graph generated from the data obtained in this test. The graph shows a comparison between the particle size distribution of the processed EAF slag and that of a Portland cement type CP I.

Figure 9: Graph comparing the laser granulometry of ground EAF slag with CP I



Source: Author, 2025

- **Determination of Specific Surface Area by the Blaine Method**

The Blaine method was used in this study to determine the specific surface area of the ground EAF slag. According to the standard that supports this test, NBR NM 76 (ABNT, 1996), the minimum required value for a material to be considered suitable for classification as a cementitious material is equal to or greater than 2600 cm²/g. The EAF slag analyzed in this study achieved a specific surface area of 4350 cm²/g, as shown in Table 4.

Table 4: Test result for determining the fineness of EAF slag

Fineness Determination by the Air Permeability Method		Specific Surface Area (cm ² /g)
Standard Limit	≥ 2600	
Ground Pig Iron Slag	4350	
Source: Author, 2025		

3.2.2 Chemical Characterization

- **X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF)**

The X-ray fluorescence (XRF) test was carried out in accordance with NBR 14656 (ABNT, 2023), at the laboratory of a cement factory located in Currais Novos, Rio Grande do Norte. Regarding the chemical characterization, the XRF test revealed the presence of the elements listed in Table 5, along with their respective percentages. A predominance of silica (SiO₂) was observed, with a content of 40.48%.

Caroline Vieira Marçal

8 | Page

Table 5: Chemical composition from the XRF test of EAF slag

X-Ray Fluorescence					
Chemical Components					
SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	SO ₃ %
40,48%	14,90%	4,57%	33,80%	4,48%	0,13%

Source: Author, 2025

- **Hydraulicity**

The classification of slag is based on the ratio between the oxides of Calcium, Magnesium, and Aluminum relative to Silicon oxide. Hydraulicity was calculated according to NBR 16697 (ABNT, 2018) using the data from the XRF test. The result of the test showed a hydraulicity index of 1.28%.

- **Consistency Index**

This test was conducted at the laboratory of the Federal Institute of Pará, following the guidelines of NBR 13276 (ABNT, 2016). The test resulted in a flow diameter of 16.5 cm using 200 ml of water. No bleeding was observed in the mortar, and it exhibited good cohesion, indicating that in the fresh state, its components did not segregate and remained homogeneous, as shown in Figure 10.

Figure 10: Consistency index test on the processed EAF slag sample (i) mortar molded in the truncated cone (ii) mortar after flow table drops



Source: Author, 2025

3.2.3 Evaluation of Pozzolanic Activity

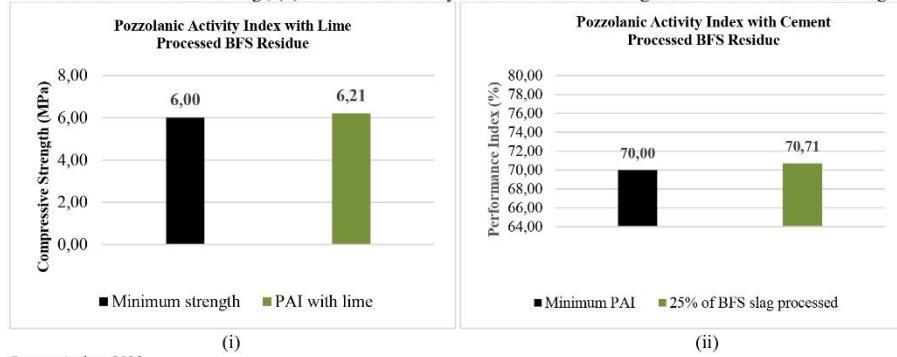
- **Pozzolanic Activity Index (PAI) with Lime**

The PAI test with lime was conducted in accordance with ABNT NBR 5751:2015 at the laboratory of the Federal Institute of Pará. The objective was to analyze whether the processed EAF slag reacts with calcium hydroxide, potentially leading to secondary reactions during cement hydration. The minimum required strength at 28 days for this test is 6.0 MPa, and the sample with processed EAF slag reached 6.21 MPa at 28 days, as shown in the graph in Figure 11.

- **Pozzolanic Activity Index (PAI) with Cement**

The PAI test with cement was conducted according to the parameters of NBR 5752 (ABNT, 2014) at the laboratory of the Federal Institute of Pará, using a sample of processed EAF slag. The objective of this test is to assess whether the studied material contributes to strength gain at 28 days when included in the tested mixture. According to the normative parameters, the minimum performance index for this test must be 70.00%. At 28 days, the mixture containing processed EAF slag achieved a performance of 70.71%, as shown in Figure 11.

Figure 11: Graphs showing pozzolanic activity test results: (i) Pozzolanic Activity Index with lime using beneficiated blast furnace slag ; (ii) Pozzolanic Activity Index with cement using beneficiated blast furnace slag



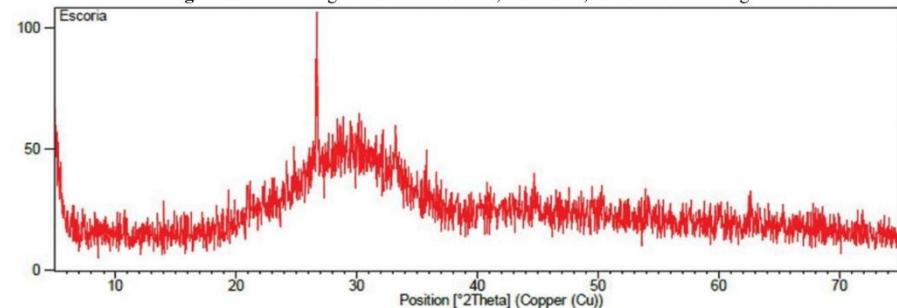
Source: Author, 2025

3.2.4 Mineralogical Characterization

- **X-ray Diffraction (XRD)**

The mineralogical characterization of the materials was obtained through X-ray Diffraction (XRD), as shown in Figure 12, to determine the crystalline structure. The test was conducted using a BRUKER D2 Phaser device with a copper (Cu) $\text{K}\alpha$ radiation anode ($\lambda = 1.54184 \text{ \AA}$), equipped with a Lynxeye detector (1D mode). The equipment operated at 30 kV and 10 mA, with a power output of 300 W. The scan range was from 5° to 75° 2θ , with a step size of 0.02° and a step time of 0.2 s, using the powder method. The test was performed at the Mineralogy Laboratory of the Faculty of Materials Engineering at the Federal University of the South and Southeast of Pará (Unifesspa).

Figure 12: Mineralogical Characterization, XRD Test, Processed EAF Slag



Source: Author, 2025

3.2.5 Environmental Characterization

- **Leaching**

We conducted the leachate extraction test following the recommendations of NBR 10005 (ABNT, 2004), at the laboratory of a cement factory located in Currais Novos, Rio Grande do Norte. The objective of this test is to assess the potential for contamination by heavy metals or other toxic compounds. The results of the test are shown in Table 6. After analysis, it was verified that the regulatory limits were met.

Table 6: Environmental Test – Leachate Extraction on a Sample of Processed EAF Slag

Processed Blast Furnace Slag

NBR 10.005 – Procedure for Obtaining Leachate Extract from Solid Waste

Element	Permitted Concentration (mg/L) (According to Annex F of NBR 10.004)	Measured Concentration (mg/L)	Status
Cadmium	0.5	0.005	Below Maximum Limit
Copper	-	0.035	The element is not listed in the standard annex
Chromium	5	0.3971	Below Maximum Limit
Iron	-	16.686	The element is not listed in the standard annex
Manganese	-	46.696	The element is not listed in the standard annex
Zinc	-	0.3545	The element is not listed in the standard annex

Source: Author, 2025

- **Solubility**

The solubilized extract test is another assessment included in the environmental analyses. Its purpose is to identify substances that may be released under usage or disposal conditions. The test was conducted in accordance with NBR 10006 (ABNT, 2004) at the laboratory of a cement factory located in Currais Novos, Rio Grande do Norte. The data obtained from the test are presented in Table 7, and all analyzed elements were found to be below the regulatory limits.

Table 7: Environmental Test – Solubilized Extract from a Sample of Processed EAF Slag

Processed Blast Furnace Slag

NBR 10.006 – Procedure for Obtaining Solubilized Extract from Solid Waste

Element	Permitted Concentration (mg/L) (According to Annex F of NBR 10.004)	Measured Concentration (mg/L)	Status
Cadmium	0	-0.0122	Concentration below the equipment detection limit
Copper	2	-0.0076	Concentration below the equipment detection limit
Chromium	0.1	0.0058	Below Maximum Limit
Iron	0.3	-0.0854	Concentration below the equipment detection limit
Manganese	0.1	0.0065	Below Maximum Limit
Zinc	5	0.1087	Below Maximum Limit

Source: Author, 2025

IV. Discussion

The obtained results demonstrate the potential of beneficiated blast furnace slag (BFS) as a supplementary cementitious material. The beneficiation process of BFS proved effective in improving the material's fineness and specific surface area. According to CUNHA (2022), after beneficiation, the material's reactivity increases, which is supported by its pozzolanic activity indices—both with lime (6.21 MPa) and cement (70.71%)—exceeding the limits established by the Brazilian standards NBR 5751 and NBR 5752.

The chemical composition of the beneficiated BFS, with its high silica content (40.48%) and predominantly amorphous structure, promotes the formation of hydrated compounds (C-S-H), essential for cement's mechanical strength development. This indicates that slag beneficiation contributed to the activation of latent phases, as noted by Lothenbach et al. (2011) and Bocira & Beck (2007).

Our environmental tests (leaching and solubilization) confirmed that beneficiated BFS poses no significant contamination risks, complying with the limits set by NBR 10004. From a mineralogical perspective, the absence of crystalline peaks in the XRD analysis reinforces the predominance of glassy phases, crucial for its reactivity in cementitious systems.

In summary, the results demonstrate that beneficiated slag serves as both a sustainable and technically viable alternative for partial clinker replacement in CP III-type cements. This approach not only reduces CO₂ emissions but also advances circular economy practices within the cement industry.

V. Conclusion

The beneficiated blast furnace slag analyzed in this study exhibits suitable physical, chemical, mineralogical, and environmental characteristics for its application as a supplementary cementitious material in the production of Portland cement CP III-E 32.

The high fineness, specific surface area exceeding normative requirements, and amorphous structure contributed to the material's satisfactory technical performance, as evidenced by pozzolanic activity tests. Additionally, environmental stability was confirmed, ensuring safe usage.

Thus, the beneficiated BFS (blast furnace slag) can be considered a promising alternative to reduce clinker demand and associated CO₂ emissions in cement production, supporting more sustainable practices in civil construction. We recommend future studies for industrial-scale validation and optimization of slag percentages in blast furnace Portland cement manufacturing.

References

- [1]. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004. Resíduos sólidos – Classificação – Parte 1: Requisitos de classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- [2]. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10005. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- [3]. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10006. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- [4]. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13276. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- [5]. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14656. Cimento Portland e matérias-primas — Análise química por espectrometria de raios X — Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2023.
- [6]. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16372. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.
- [7]. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16697. Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- [8]. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16917. Agregado grão – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.
- [9]. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 17054. Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.
- [10]. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5751. Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.
- [11]. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5752. Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
- [12]. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 23. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2000.
- [13]. AHMAD, Jawad; KONTOLEON, Karolos J.; MAJDI, Ali; NAQASH, Muhammad Tayyab; DEIFALLA, Ahmed Farouk; KAHLA, Nabil Ben; ISLEEM, Haytham F.; QALDI, Shaker M. A. A comprehensive review on the ground granulated blast furnace slag (GGBS) in concrete production. Sustainability, v. 14, p. 8783, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14148783>. Acesso em: 18 set. 2024.
- [14]. ALMEIDA JÚNIOR, Joaquim Paulo de; SOUSA, Ísis da Rocha; SILVA NETO, Arubatan Maracaipe da; SILVA, Marcelo Francisco da; PEREIRA FILHO, Jurandir. Dinâmica de uso e ocupação do solo gerado pelo desenvolvimento agropecuário e industrial em Açaílandia-MA, na Amazônia Oriental Brasileira. Revista Caderno Pedagógico – Studies Publicações e Editora Ltda., Curitiba, v. 21, n. 8, p. 1-21, 2024. DOI: 10.54033/cadpedv21n8-031.
- [15]. BARROS, Leandro Henrique Costa; MACEDO, Alcebiades Negrão. Análise do uso de rejeito de bauxita como adição pozolânica para cimento Portland. Cerâmica Industrial, v. 30, e0930, 2025. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/10.4322/cerind.2025.009/pdf/ci-30-e0930.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2025. <https://doi.org/10.4322/cerind.2025.009>. ISSN 1413-4608.
- [16]. BOEIRA, Alexandre Pitol; BECK, Daniel. Notas de aula da disciplina Tecnologia dos Materiais. Curso Técnico em Mecânica Industrial. Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas – RS, Unidade de Ensino Passo Fundo. Passo Fundo, RS: Ministério da Educação, Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica, 2007.
- [17]. CECILHIN, Luana; MATOSKI, Adalberto; LIMA, Adauto José Miranda de; WEBER, Alessandra Monique; TOKARSKI, Rosângela Basso. Efeito da adição de escória de alto-forno em compósitos com bambu mosso. Revista Matéria, [S.l.], v. 23, n. 4, e12240, 2018. ISSN 1517-7076. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0574>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- [18]. CUNHA, Rodrigo Rodrigues da. *Emprego de resíduo de silício metálico como material pozolânico na produção de cimento Portland composto*. 2022. 109 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022. Orientador: Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/handle/2011/15770>. Acesso em: 10 dez. 2024.

- [19]. DINA, M. S. Effect of cooling technique of blast furnace slag on the thermal behavior of solid cement bricks. *Journal of Cleaner Production*, v. 79, p. 134-141, 2014.
- [20]. FARIA, M. M.; FARIA, C. L. R.; PICANÇO, M. S. Escória de alto-forno como substituição parcial ao cimento Portland. *Revista Matéria*, v. 28, n. 2, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mat/a/nC5DgflDf53ZgPl5G8wyDHb/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 8 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0120>.
- [21]. GOMES, Daniela Amorim; TAVARES, Daniel Pimentel; CORREA, Welder da Silva. Avaliação técnica da fabricação de concreto com agregado de escória de alto-forno. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ENTAC, 2020.
- [22]. GOOGLE. Google Earth. Disponível em: <https://earth.google.com>. Acesso em: 2 abr. 2025.
- [23]. INDIAN BUREAU OF MINES. Slag - Iron and Steel. Indian Minerals Yearbook 2018 (Part II: Metals and Alloys). 57th ed. Nagpur: Ministry of Mines, Government of India, 2018. Disponível em: www.ibm.gov.in. Acesso em: 29 mar. 2025.
- [24]. LIU, Xing; XIAO, Guiyuan; YANG, Dunhan; DAI, Lin; TANG, Aiwei. Sustainable cementitious materials: Strength and microstructural characteristics of calcium carbide residue-activated ground granulated blast furnace slag-fly ash composites. *Sustainability*, v. 16, p. 11168, 2024. DOI: [10.3390/su16241168](https://doi.org/10.3390/su16241168).
- [25]. LOTHENBACH, Barbara; SCRIVENER, Karen; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, [S.l.], v. 41, n. 12, p. 1244-1256, dez. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/241089075_Supplementary_Cementitious_Materials. Acesso em: 9 abr. 2025. DOI: [10.1016/j.cemconres.2010.12.001](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001).
- [26]. MANCINI, A. et al. Iron speciation in blast furnace slag cements. *Cement and Concrete Research*, v. 140, p. 106287, 2021. DOI: [10.1016/j.cemconres.2020.106287](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106287).
- [27]. MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th ed. McGraw-Hill, 2014.
- [28]. NEHDI, Moncef L. Clay in cement-based materials: critical overview of state-of-the-art. *Construction and Building Materials*, [S.l.], v. 51, p. 372-384, 2014. Elsevier BV. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181300980X>. Acesso em: 9 abr. 2025. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2013.10.059](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.059). ISSN 1879-0526.
- [29]. ÖZBAY, E.; ERDEMİR, M.; DURMUS, H. I. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. *Construction and Building Materials*, v. 105, p. 423-434, 2016.
- [30]. PIMENTEL, Maurilio Gomes; VASCONCELOS, Adriano Luiz Roma; PICANÇO, Marcelo de Souza; SOUZA, José Victor Brasil de; MACÉDO, Alcebiades Negrão. Caracterização da escória de alto-forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA – CONTEC'2017, 2017, Belém. Anais... Belém: CONFEE, 2017.
- [31]. PIMENTEL, Maurilio Gomes; VASCONCELOS, Adriano Luiz Roma; PICANÇO, Marcelo de Souza; SOUZA, José Victor Brasil de; MACÉDO, Alcebiades Negrão. Caracterização da escória de alto forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil. *Brazilian Applied Science Review*, Curitiba, v. 3, n. 2, p. 895-907, 2019. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BASR/article/view/927>. Acesso em: 9 abr. 2025. DOI: [10.34115/basr.v3i2.927](https://doi.org/10.34115/basr.v3i2.927). ISSN 2595-3621.
- [32]. SA, Evelyn Moraes Hosken de. Avaliação do uso da escória de açoaria como agregado e ligante em materiais álcali-ativados. 2021. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil, Belo Horizonte, 2021.
- [33]. SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). Relatório anual 2023. Brasília, DF: SNIC, 2023. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/1732731328.pdf. Acesso em: 2 abr. 2025.
- [34]. SNELLINGS, Ruben; MERTENS, Gilles; ELSEN, Jan. Supplementary Cementitious Materials. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, [S.l.], v. 74, p. 211-278, 2012. DOI: [10.2138/rmg.2012.74.6](https://doi.org/10.2138/rmg.2012.74.6).
- [35]. THOMAZ, Eduardo C. S. Escória de alto-forno: parte 1 - fabricação. Disciplina Cimentos e Concretos. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia – IME, 2012. Nota de aula. Disponível em: http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos_escoria_fabricacao.pdf. Acesso em: 27 mar. 2025.