

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

KARINE LOUISI PALEARI DA SILVA

ANÁLISE REOLÓGICA DO PÓ DE FORNO PROVENIENTE DA INDÚSTRIA CIMENTÍCIA PARA FINS DE APLICAÇÃO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR

CURITIBA

2025

KARINE LOUISI PALEARI DA SILVA

ANÁLISE REOLÓGICA DO PÓ DE FORNO PROVENIENTE DA INDÚSTRIA CIMENTÍCIA PARA FINS DE APLICAÇÃO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR

Rheological analysis of oven dust from the cement industry for application purposes as a supplementary cement material

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil (PPGEC), do programa da Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

CURITIBA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



KARINE LOUISI PALEARI DA SILVA

ANÁLISE REOLÓGICA DO PÓ DE FORNO PROVENIENTE DA INDÚSTRIA CI-MENTÍCIA PARA FINS DE APLICAÇÃO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 12 de Novembro de 2025

Dr. Wellington Mazer, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Laura Silvestro, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Rodrigo Cezar Kanning, Doutorado - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná (Ifpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 12/11/2025.

Dedico este trabalho aos meus pais, que não estão presentes, mas que ficariam felizes por este momento.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão às pessoas e instituições que contribuíram de maneira significativa à realização deste trabalho de pesquisa.

Primeiramente, agradeço à Instituição de Ensino, pelos recursos disponibilizados que tornaram possível a realização deste estudo.

Meu sincero agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. Wellington Mazer, pela orientação excepcional, paciência e valiosas sugestões ao longo deste projeto. Sua expertise e seu comprometimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também aos meus colegas das disciplinas, que me orientaram e aconselharam, pela colaboração, discussões enriquecedoras e apoio mútuo durante todo o processo de pesquisa.

Às mulheres da reologia, Daniela Bresolin e Laura Silvestro, que dedicaram muito de seu tempo a sanar minhas dúvidas na área de reologia.

Gratidão ao Nilton Amurim e sua equipe, que me forneceram as amostras para testes e todo o seu conhecimento sobre produção de cimento.

Ao professor Philippe Jean Paul Gleize, por ceder o laboratório de Nanotecnologia da UFSC para a realização dos ensaios de reometria, expressei minha sincera gratidão pela generosidade.

Ao laboratório de Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da UTFPR, pela realização dos ensaios de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), foi de extrema relevância, meu agradecimento.

Ao laboratório do Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACOC) da UTFPR, pela realização dos ensaios de granulometria a laser, obrigada pelo suporte engajado.

Por fim, expressei minha gratidão a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

RESUMO

A indústria cimenteira global desempenha um papel crucial no desenvolvimento de infraestruturas; porém, está entre as principais emissoras de dióxido de carbono (CO_2), contribuindo significativamente para as mudanças climáticas. Neste contexto, a pesquisa por materiais cimentícios suplementares (MCS) que substituam parte do clínquer do cimento, especialmente aqueles derivados de resíduos industriais, emerge como área de investigação promissora. Essa abordagem não apenas visa mitigar o impacto ambiental da produção de cimento, como também promove valorização de subprodutos e impulsiona os princípios fundamentais da economia circular. Este estudo investigou a viabilidade técnica e o comportamento físico-químico do pó de filtro, resíduo da produção de cimento, como material cimentício suplementar em pastas de CPV-ARI. Foram realizadas análises físicas, químicas e mineralógicas do resíduo, além de ensaios de resistência à compressão, reometria rotacional e calorimetria. O objetivo foi avaliar o desempenho das pastas, compreender a influência do resíduo em suas propriedades e verificar seu potencial na redução de emissões de CO_2 . Os resultados de área específica indicaram aumento com a incorporação do resíduo, evidenciando efeito fíler e melhor empacotamento das partículas. Esse comportamento resultou no desempenho mecânico, em que a pasta de referência apresentou 46,4 MPa aos 28 dias, enquanto a mistura com 5% de pó de filtro atingiu 50,7 MPa, representando aumento de aproximadamente 9%. Já a mistura com 7% apresentou 45,5 MPa, correspondendo a redução de cerca de 2% em relação à referência. Nos ensaios reológicos, a amostra com 5% de adição apresentou melhor equilíbrio entre tensão de cisalhamento, viscosidade e área de histerese, indicando comportamento mais estável e adequado às etapas de mistura, transporte e aplicação. Entretanto, a mistura com 7% apresentou aumento da viscosidade e perda de trabalhabilidade. Na calorimetria isotérmica, observou-se antecipação do pico de hidratação e redução do calor acumulado com a adição do resíduo, indicando alteração na cinética de hidratação e efeito de nucleação. A análise ambiental corroborou que a utilização do pó de filtro contribui para significativa redução da pegada de carbono da produção de cimento. De modo geral, o teor de 5% de pó de filtro apresentou o melhor desempenho geral, conciliando aumento de resistência, comportamento reológico adequado e redução do calor de hidratação, além de contribuir para a diminuição do consumo de clínquer e das emissões de CO_2 . Os resultados confirmam o potencial do reaproveitamento de resíduos do próprio processo cimenteiro como estratégia técnica e ambientalmente viável. Como limitação, destaca-se o número restrito de amostras, sendo recomendada a ampliação dos estudos reológicos e investigações em escala maior em trabalhos futuros.

Palavras-chave: pó de forno de cimento, reologia; cimento; resíduos industriais; economia circular; sustentabilidade; CO_2 .

ABSTRACT

The global cement industry plays a crucial role in infrastructure development. However, it is among the main emitters of carbon dioxide (CO₂), contributing significantly to climate change. In this context, research on supplementary cementitious materials (SCMs) that partially replace cement clinker especially those derived from industrial residues has emerged as a promising area of investigation. This approach not only aims to mitigate the environmental impact of cement production but also promotes the valorization of by-products and advances the fundamental principles of the circular economy. This study investigated the technical feasibility and physicochemical behavior of filter dust, a residue from cement production, as a supplementary cementitious material in CPV-ARI cement pastes. Physical, chemical, and mineralogical analyses of the residue were carried out, along with compressive strength tests, rotational rheometry, and calorimetry. The objective was to evaluate the performance of the pastes, understand the influence of the residue on their properties, as well as verify its potential for reducing CO₂ emissions. Specific surface area results indicated an increase with the incorporation of the residue, which evidenced a filler effect and improved particle packing. This behavior was reflected in the mechanical performance: the reference paste reached 46.4 MPa at 28 days, whereas the mixture containing 5% filter dust achieved 50.7 MPa, representing an increase of approximately 9%. In contrast, the mixture with 7% addition reached 45.5 MPa, corresponding to a reduction of about 2% compared with the reference. In the rheological tests, the sample with 5% addition showed a better balance among shear stress, viscosity, and hysteresis area, which indicates a more stable behavior and better suitability for mixing, transport, and application stages. Therefore, the mixture with 7% addition exhibited increased viscosity and reduced workability. In isothermal calorimetry, an anticipation of the hydration peak and a reduction in accumulated heat were observed with the addition of the residue, indicating changes in hydration kinetics and a nucleation effect. The environmental analysis confirmed that the use of filter dust contributes to a significant reduction in the carbon footprint of cement production. Overall, the 5% filter dust content showed the best overall performance, combining increased strength, adequate rheological behavior, and reduced heat of hydration, in addition to contributing to the reduction of clinker consumption and CO₂ emissions. The results confirm the potential for reusing residues from the cement production process itself as a technically and environmentally viable strategy. As a limitation, the restricted number of samples is highlighted, and further rheological studies and larger-scale investigations are recommended for future research.

Keywords: cement kiln dust; rheology; cement; industrial waste; circular economy; sustainability; CO₂.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Funcionamento do filtro de mangas.....	20
Figura 2 – Filtro de mangas.....	21
Figura 3 – Resíduo do pó de filtro de mangas.....	22
Figura 4 – Etapas do processo do resíduo do pó de filtro	22
Figura 5 – Porcentagens médias da composição química do pó de filtro	23
Figura 6 – Classificação dos fluídos de acordo com comportamento reológico	26
Figura 7 – Evolução do calor de hidratação de pastas de cimento Portland.....	30
Figura 8 – Produção de cimento até o ano de 2050 para o cenário brasileiro e mundial.....	32
Figura 9 – Evolução da utilização de adições ao clínquer	37
Figura 10 – Fluxograma dos métodos.....	40
Figura 11 – Preparação de amostras.....	41
Figura 12 – Difração de raio X.....	41
Figura 13 – Granulometria a laser.....	42
Figura 14 – Microscópio eletrônico de varredura.....	43
Figura 15 – Preparação das amostras.....	44
Figura 16 – Ensaio Chappelle modificado.....	44
Figura 17 – Corpos de prova	45
Figura 18 – Prensa hidráulica.....	45
Figura 19 – Equipamento de calor de hidratação.....	46
Figura 20 – Recipiente	47
Figura 21 – Misturador de alta eficiência	48
Figura 22 – Equipamento de reometria	49
Figura 23 – Geometria cross hatched de 35 mm	49
Figura 24 – Difratoograma REF	53
Figura 25 – Difratoograma REF1	54
Figura 26 – Difratoograma REF3.....	54
Figura 27 – Difratoograma REF4.....	55
Figura 28 – Difratoograma REF5.....	55
Figura 29 – Difratoograma REF6.....	56
Figura 30 – Difratoograma REF7	56
Figura 31 – Granulometria a laser.....	58
Figura 32 – Comparação dos diâmetros característicos (D10, D50 e D90)	59
Figura 33 – Microscópio de varredura.....	61
Figura 34 – Resistência à compressão a 1 dia	63
Figura 35 – Resistência à compressão a 7 dias	64
Figura 36 – Resistência à compressão a 28 dias	64
Figura 37 – Tensão de cisalhamento (Pa) x Taxa de cisalhamento (s-1)	66
Figura 38 – Viscosidade (Pa.s) x Taxa de cisalhamento (s-1)	67
Figura 39 – Tensão de escoamento dinâmica (Pa).....	70
Figura 40 – Viscosidade equivalente (Pa.s)	71
Figura 41 – Calor de hidratação	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais modelos reológicos	26
Tabela 2 – Taxa de cisalhamento máxima em várias etapas do histórico de vazão do concreto	28
Tabela 3 – Indicador para indústria brasileira de cimento (KPI)	35
Tabela 4 – Resultado do comportamento pó de forno de cimento (CKD).....	38
Tabela 5 – Composição das amostras	39
Tabela 6 – Ensaio químicos.....	51
Tabela 7 – Ensaio mineralógicos	52
Tabela 8 – Ensaio físicos	57
Tabela 9 – Diâmetro das partículas (µm).....	58
Tabela 10 – Análise comparativa dos diâmetros característicos das amostras	60
Tabela 11 – Índice de atividade pozoalânica.....	62
Tabela 12 – Comparativo das resistências	65
Tabela 13 – Modelos reológicos	68
Tabela 14– Cálculo de emissões kg CO ₂ /t.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIE	Agência Internacional de Energia
ASTM	American Society for Testing and Materials
AIE	Agência Internacional de Energia
C ₂ S	Silicato bicálcico
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
C ₄ AF	Ferroaluminato tetracálcico
CEMBUREAU	Associação Europeia do Cimento
CH	Hidróxido de cálcio
CKD	Cement Kiln Dust (pó de forno de cimento)
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CO ₂	Dióxido de carbono
COP-26	26ª Conferência das Partes sobre Mudanças Climáticas
CP	Cimento Portland
CPI	Cimento Portland comum
CPI S	Cimento Portland comum com adição
CP II E	Cimento Portland composto com escória
CP II F	Cimento Portland composto com filer
CP II Z	Cimento Portland composto com pozolana
CP III	Cimento Portland de alto-forno
CP IV	Cimento Portland pozolânico
CP V-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
DRX	Difração de raios X
FRX	Fluorescência de raios X
GCCA	Associação Global de Cimento e Concreto
H ₂ O	Água
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MCS	Material cimentício suplementar
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

T	Temperatura
τ	Tensão de cisalhamento
τ_0	Tensão de escoamento
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento
ν	Viscosidade
η	Viscosidade aparente
Q	Calor liberado
q	Taxa de liberação de calor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	15
1.1.1 Objetivo geral	15
1.2 Justificativa	15
1.3 Contextualização	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 Cimento	18
2.2 Pó de filtros de mangas	20
2.3 Reologia	23
2.4 Calor de hidratação	28
2.5 Sustentabilidade	32
2.6 Materiais Cimentícios Suplementares	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 Materiais	39
3.2 Métodos	39
3.2.1 Caracterização	40
<u>3.2.1.1 Análise química</u>	<u>40</u>
3.2.1.1.1 <i>Espectrômetro de fluorescência</i>	40
<u>3.2.1.2 Análise física</u>	<u>41</u>
3.2.1.2.1 <i>Difração de raio X</i>	41
3.2.1.2.2 <i>Granulometria a laser</i>	42
<u>3.2.1.3 Análise morfológica</u>	<u>42</u>
3.2.1.3.1 <i>Microscopia eletrônica de varredura</i>	42
<u>3.2.1.4 Análise físico-químico</u>	<u>43</u>
3.2.1.4.1 <i>Chapelle modificado</i>	43
<u>3.2.1.5 Análise mecânica</u>	<u>44</u>
3.2.1.5.1 <i>Resistência dos corpos de prova</i>	44
3.2.2 Calor de hidratação	46
3.2.3 Reologia	47
4 RESULTADOS E ANÁLISES	51
4.1 Caracterização das amostras	51
4.1.1 Análise química	51
4.1.2 Análise física	57

4.1.3 Análise morfológicas	61
4.1.4 Análise físico-químico.....	62
4.1.5 Análise mecânica	63
4.2 Reometria.....	66
4.3 Calor de hidratação	71
4.4 Análise ambiental de emissões de CO₂.....	73
5 CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo. Sua aplicação abrange diversas áreas da engenharia civil, como a construção de casas, edifícios, pontes, viadutos, túneis, pavimentos, usinas hidroelétricas e obras de contenção (Hewlett, 2004). A Associação Global de Cimento e Concreto (GCCA, 2024) anunciou que, devido à já existente preocupação com as emissões de CO₂, a indústria cimenteira, responsável por 80% da produção de cimento nos países ocidentais, assumiu um compromisso para alcançar a neutralidade de carbono até 2050.

A indústria global do cimento responde por 7% da emissão de CO₂. No Brasil, o segmento representa 2,3% das emissões totais desse gás na atmosfera, segundo dados do Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal, dados ABCIC (Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto, 2024) (ABCIC, 2025).

Conforme Imbabi; Carrigan; Mckenna (2012), na cadeia produtiva da produção de cimento, a etapa de extração emite 7% de dióxido de carbono; o transporte até a fábrica, 1,5%; no processo de produção, o combustível utilizado emite entre 35% e 50% no processo de transformação do clínquer; 5% na moagem; e 1,5% no transporte do concreto.

A capacidade produtiva de cimento no Brasil é de aproximadamente 94 milhões de toneladas por mês, conforme o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2022). O SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento) e a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) enviaram um documento à COP-26 (Conferência das Partes, 2024) com objetivo de mostrar que a indústria do cimento no país é a menos agressiva do mundo, já que ações promovidas pelo uso de matérias-primas (filer calcário, escórias siderúrgicas, e cinzas de termelétricas, etc.) e de uso de co-processamentos como combustíveis alternativos, dentre eles: biomassa, resíduos industriais, pneus, entre outros são constantes, de acordo com a fonte (ABCP, 2023; ABCIC, 2025).

No setor da construção civil, a economia circular (CE) é apresentada hoje como o melhor método para alcançar uma sociedade sustentável e um balanço de carbono neutro. Conforme Lima et al. (2024), a economia circular (CE) e a mitigação climática (CM) são dois dos principais desafios atuais da sociedade. O conceito de CE foi introduzido pela primeira vez na década de 1970 (Stahel, 2016) e disseminou-se

com definições e políticas que apoiam várias partes interessadas (Kirchherr et al., 2023). Dessa forma, a estrutura dos dez Rs (recusar, reduzir, repensar, reparar, reutilizar, remanufaturar, recondicionar, reaproveitar, reciclar e recuperar) criada por este conceito é amplamente aceita (Volker et al., 2020).

No processo industrial da produção do cimento, conforme Coelho (2016), são utilizados filtros de mangas para reter a dispersão de partículas desde o início da moagem das matérias primas, até a homogeneização da farinha, a calcinação e a clínquerização. O resíduo ficante nos filtros voltam para o processo desde a etapa inicial, tendo gasto de calor enérgico e assim emitindo CO₂. Nas fábricas mais modernas, este resíduo é destinado a um silo e utilizado como adição no cimento em quase toda a sua totalidade (Adaska et al., 2008).

Este resíduo, o pó de filtro, também chamado em algumas literaturas de pó de forno de cimento (Cement Kiln Dust - CKD) pode ser utilizado como materiais cimentícios suplementares (MCS) e, para isto, é preciso conhecer suas características físicas e químicas, bem como o desempenho das resistências do cimento. Além disso, é necessário avaliar sua cadeia produtiva com um olhar voltado à redução de emissões de carbono, economia circular e sustentabilidade (Siddique et al., 2016).

A reologia contribui para esses estudos devido à sua precisão e rapidez de análise. A reologia é o ramo da física usada para descrever e avaliar a deformação e o comportamento de fluxo dos materiais (Mezger, 2009). Cada material ou sistema de aplicação demanda um conjunto de características específicas da pasta fluida. A maior dificuldade em seu estudo está na obtenção de uma única técnica capaz de simular todas as situações simultaneamente. Os ensaios exclusivamente da norma de cimento (NBR 16697, 2018) não garantem, muitas vezes, o desempenho desejado para todas as suas aplicações. Assim, a utilização da reologia pode ajudar em caracterizações mais adequadas para definir as diferentes aplicações.

Reometria, por sua vez, é o termo utilizado para tudo que estiver relacionado à medição de dados reológicos. Com o equipamento de reometria chamado de reômetro, é possível avaliar a tensão, a velocidade e a viscosidade de cisalhamento (Betioli et al., 2009). Segundo Betioli et al. (2009), com o surgimento e a evolução dos reômetros, a determinação dos parâmetros reológicos fundamentais tornou-se possível em diferentes taxas de cisalhamento, obtendo-se, dessa forma, o perfil reológico do material. Outra vantagem é a possibilidade de simular os processos relacionados

à mistura, transporte e aplicação variando-se a taxa de cisalhamento por meio de ensaios de fluxo. Ainda, dependendo do tipo de reômetro, é possível avaliar a consolidação desses materiais, isto é, avaliar as alterações viscoelásticas associadas à pega do cimento, sendo o ensaio oscilatório o mais adequado para essa situação. Ambos os métodos são classificados como reometria rotacional e com geometria constante durante a medida. A viscosidade pode ser considerada a principal propriedade reológica de um fluido, pois indica sua facilidade de escoar continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento externa.

Além da reologia e da reometria, como complemento, será utilizado o ensaio de calor de hidratação com o equipamento calorímetro, método que se baseia no calor liberado durante a hidratação do cimento (Neville, 2013).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o comportamento reológico de resíduos industriais como material cimentício suplementar do processo da produção de cimento.

1.1.2 Objetivo específicos

Os objetivos específicos são:

- Analisar o comportamento reológico em função do teor de adição na pasta de cimento;
- Avaliar a influência do teor de adição nas características físicas, químicas e mecânicas das misturas da pasta de cimento;
- Quantificar o impacto da redução de emissões de CO₂ decorrente da utilização do resíduo de pó de forno de cimento (CKD);

1.2 Justificativa

Levando em consideração que, no processo de produção do cimento, o filtro de mangas retém cerca de 6 mil toneladas de resíduo por mês, equivalentes a 5% da

produção da planta a qual foi fornecida às amostras. As empresas cimentícias enfrentam a necessidade de adaptar-se à diminuição de emissão de CO₂ e o uso de adições à base de resíduos de vários processos industriais tem sido bastante estudado.

O pó de filtro é um subproduto do processo de fabricação de cimento e, nos últimos anos, avanços na gestão e no uso do pó de filtro de cimento foram alcançados, reduzindo assim sua dependência do descarte em aterros sanitários. A sustentabilidade tem sido o foco da indústria de cimento, não apenas nos produtos que usam cimento, mas também em seu processo de fabricação. Um exemplo é a indústria de cimento dos EUA (Estados Unidos), que reduziu a quantidade de pó de filtro no período de 1990 a 2006, em aterros sanitários, em 47%. Ao mesmo tempo, a capacidade geral de clínquer nos EUA aumentou 28% desde 1990. Além disso, muitas das fábricas mais antigas e ineficientes estão sendo substituídas por plantas mais modernas ou sendo reformadas com novas tecnologias para serem mais eficientes e ecologicamente corretas (Schneider, 2019b).

A maior parte do pó de filtro é reciclada de volta para o forno de cimento como matéria-prima. Ademais, novas tecnologias permitiram que o pó de filtro seja utilizado como material cimentício suplementar sendo adicionado no final do processo como adição ao cimento. A reciclagem desse subproduto reduz a quantidade de clínquer, como também reduz a necessidade de calcário e outras matérias-primas, o que economiza recursos naturais e ajuda a conservar energia (Adaska et al., 2008).

Portanto, a utilização do pó de filtro aplicado como adição no cimento (MCS) pode contribuir para sustentabilidade e economia circular e melhorar desempenho do cimento, que será analisado pelos ensaios de reologia e calorimetria.

1.3 Contextualização

A produção de cimento apresenta impactos significativos ao meio ambiente. Essa cadeia produtiva inicia-se na extração de calcário e argila, etapa que pode provocar alterações ambientais relevantes e, em alguns casos, irreversíveis. Dentre os impactos, tem-se a emissão de gases poluentes, a degradação do solo e relevo, alterações do balanço hídrico e lençol freático e possíveis contaminações através de resíduos industriais. No sistema produtivo, as emissões de partículas residuais são retidas nos filtros, diminuindo o impacto desta dispersão no ar e poluindo o entorno. A emissão atmosférica apresenta critérios de controle de qualidade do ar e é abordada

na legislação vigente brasileira, conforme a Resolução CONAMA 491/2018, nº 3, de 28 de junho de 1990 (p. 342), disposto em seu parágrafo único:

[...] Entende-se como poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar: I - impróprio nocivo ou ofensivo à saúde; II - inconveniente ao bem-estar público; III - danoso aos materiais, à fauna e flora; IV - prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

O impacto da emissão de CO₂ na etapa de extração, transporte e produção e moagem representam 97,5% destas emissões. Reduções nas emissões de CO₂ são possíveis por meio da introdução de melhorias em toda a cadeia de valor do cimento (Habert et. al, 2020).

Materiais cimentícios suplementares (MCSs) são pós solúveis silicosos, aluminossilicosos ou aluminossilicosos de cálcio usados como substitutos parciais de clínquer em cimentos. Muitos dos materiais atualmente usados como MCS são subprodutos de outras indústrias, como cinzas volantes de usinas de energia a carvão. Alguns são minerais naturais cuja entrada de energia no processamento é muito menor do que a usada na fabricação de cimento Portland (Juenger; Snellings; Bernal, 2019).

Escória de aciaria, escória de manganês, escória de cobre, escória de fundição, sílica ativa, pozolanas naturais e artificiais (argilas calcinadas), metacaulim, cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana, fíleres, são exemplos de materiais cimentícios suplementares que têm potencial aplicação como substituição parcial do clínquer Portland no cimento. O uso desses MCS pode se tornar soluções regionais ou até globais na mitigação das emissões de dióxido de carbono com o fim de reduzir o impacto ambiental associado à produção de cimento (Abrão, 2019).

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, são apresentados os tópicos sobre conceitos da adição de pó de filtro de mangas na produção do cimento tipo CPV ARI, aspectos da reologia de cimento, calor de hidratação, sustentabilidade e materiais cimentícios suplementares.

2.1 Cimento

O cimento Portland comum é composto por clínquer, que tem como matérias-primas calcário, argila ou materiais silicosos, e materiais contendo óxido de ferro e alumínio, além de uma pequena porcentagem de gesso para regularizar a pega (Nelson, 1990).

O calcário é essencialmente constituído por carbonato de cálcio (CaCO_3), porém é encontrado na natureza acompanhado de diversas impurezas, como óxidos de ferro, alumínio e silício, que podem ser benéficos. Ao contrário, também pode conter óxido de magnésio, sódio e potássio, os quais são geralmente considerados indesejáveis.

A argila utilizada na fabricação do cimento consiste principalmente em silicatos de alumínio hidratados, além de conter óxidos de ferro, alumínio e silício, que desempenham um papel essencial no processo de fabricação do cimento. Minérios de ferro e areia são adições na deficiência de alguns componentes da argila no processo. O gesso é encontrado na forma de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hemi-hidratado ou bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), e anidrita (CaSO_4). A gipsita é a forma mais utilizada na indústria cimenteira. No processo de fabricação do cimento, o gesso é adicionado para regular o tempo de pega, permitindo que o cimento permaneça moldável por mais tempo. Isso ocorre porque essa substância forma uma película ou membrana que envolve as partículas de cimento, retardando o seu endurecimento e é adicionada no estágio final da etapa produção.

Os compostos do cimento anidro são o C_3S (silicato tricálcico), o C_2S (silicato bicálcico), o C_3A (aluminato tricálcico) e o C_4AF (ferro aluminato tetracálcico) e o regulador de pega, a gipsita (Mehta et al., 2014).

A alita (C_3S) representa de 50% a 70% do peso do clínquer, seguida pelo belita (C_2S) com 15% a 30%, o celite (C_3A) com 5% a 10%, e o ferrita (C_4AF) com 5% a 15%. O C_3S é um composto metaestável, não estando em equilíbrio à temperatura

ambiente, podendo decompor-se em C_2S e CaO . Sua formação no clínquer ocorre através do resfriamento rápido da carga do forno durante o processo de fabricação de cimento (Taylor, 1997; Lea, 1970). Estudos recentes mostraram alteração destas relações: a composição do clínquer variou entre 56,5–73,9% C_3S , 4,1–24,5% C_2S , 0,8–8,4% C_3A e 7,4–13,9% C_4AF . Isto indica a grande variabilidade na composição mineralógica do clínquer Portland moderno (Andrade Neto et al., 2025b).

A alita, na presença de água, reage rapidamente e é responsável pela resistência à compressão até os 28 dias. A belita, por sua vez, hidrata mais lentamente, sendo responsável pela resistência à compressão após os 28 dias (Mehta et al., 2014; Taylor, 1997). O polimorfismo da alita é fundamental para sua reatividade e para a resistência do cimento resultante, dados dos autores (Kang et al., 2021);(Zhou et al., 2021);(Zhou et al., 2018); (Stanek; Sulovsky, 2002) . Notavelmente, cimentos com predominância de alita M1 apresentam resistência aproximadamente 10% maior do que aqueles com predominância de alita M3 (Stanek; Sulovsky, 2002). No entanto, essa conclusão necessita de mais investigação, pois parece que outros parâmetros, como a taxa de resfriamento e o íon incorporado ao cristal de alita, influenciam a reatividade mais do que o próprio polimorfismo. Por exemplo, (Maki; Goto, 1982) descobriram que o resfriamento rápido estabilizava o polimorfo M3 altamente reativo, enquanto o resfriamento lento estabilizava o polimorfo M1 menos reativo.

Segundo dados, (Andrade Neto et al., 2025b), os clínqueres exibiram predominantemente polimorfos de alita monoclinica (M1 e M3) e polimorfos de β -belita. A maioria dos clínqueres continha polimorfos C_3A cúbicos e ortorrômbicos, enquanto apenas 20% dos clínqueres apresentaram a presença de C_3A cúbico como único polimorfo.

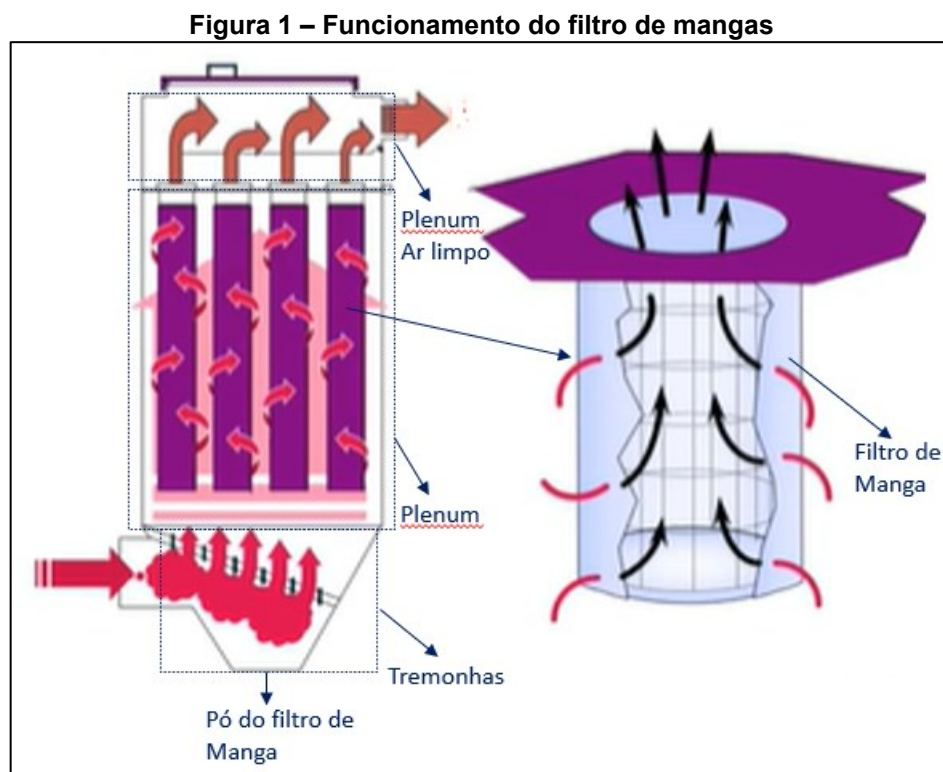
A ferrita é a fase substancialmente modificada em sua composição pela variação na relação Al/Fe e incorporação de impurezas. A reatividade no processo de hidratação é dependente de sua composição cristalina e/ou características como imperfeições geradas pela presença de impurezas. Nas primeiras horas, sua taxa de hidratação é elevada, e, em idades mais avançadas, é intermediária entre as taxas de hidratação das fases alita e belita (Odler, 1998).

O índice de hidratação é variável para cada fase cristalina contida no clínquer de cimento Portland, sendo caracterizado pela dependência sobre a formação cristalina na queima, estrutura cristalina (tamanho, geometria, imperfeições), distribuição no clínquer, área superficial, entre outros. Dentre as principais fases, a reatividade em

ordem crescente é C_2S , C_4AF , C_3S e C_3A , visto que as duas últimas fases são as que mais interferem no calor de hidratação (Ramachandran; Beaudoin, 2000).

2.2 Pó de filtros de mangas

Os filtros de mangas são utilizados na retenção de gases; o material particulado é forçado a passar do exterior para interior de mangas fabricadas em tecido especial, depositando assim os contaminantes na superfície externa desta. Os gases limpos deixam o filtro através de um plenum de ar limpo, localizado no topo da caixa do filtro (Lacerda, 2022), conforme ilustra a Figura 1.

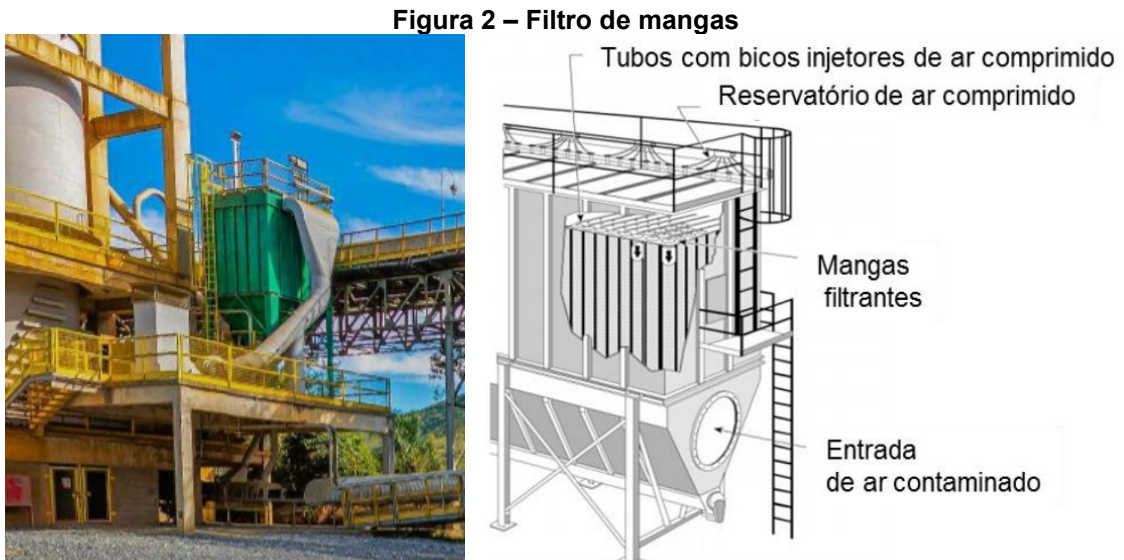


Fonte: Adaptado de (BHA, 2024)

Na Figura 1, o pó de filtro de mangas fica retido nas tremonhas, de onde posteriormente é retirado. A filtragem por meio de tecidos é empregada na purificação do ar industrial que apresenta concentrações elevadas de poeira. Esses filtros são comumente usados em grandes instalações, que contêm milhares de mangas filtrantes de tecido em paralelo. Cada manga pode ter entre 12 e 40 cm de diâmetro e podem atingir comprimentos de 3 a 10 m de altura. A manga apresenta uma eficiência de coleta baixa no início, mas torna-se altamente eficiente à medida que uma camada de

poeira se acumula na superfície externa do tecido, formando uma torta. Durante o funcionamento industrial, as mangas são periodicamente limpas para remover essa torta, o que ajuda a melhorar o fluxo de ar (Hinds, 1982).

A Figura 2 ilustra a estrutura básica desse equipamento de filtros de mangas.



Fonte: Adaptado de (Turner et al., 1998).

Na Figura 2, o esquema mostra a entrada do ar contaminado que passa pelos filtros, onde são retidas as partículas, e na parte superior, os bicos injetores de ar comprimido utilizados para desprender o resíduo e limpar os filtros.

O pó de filtro ou pó de forno de cimento (Cement Kiln Dust - CKD) utilizado nos experimentos foi retirado das tremonhas do filtro de mangas, enviado por tubulações para o silo onde é armazenado. A imagem é o resultado do resíduo retirado das tremonhas, conhecido como pó de filtro ou pó de forno de cimento, conforme Figura 3.

Figura 3 – Resíduo do pó de filtro de mangas

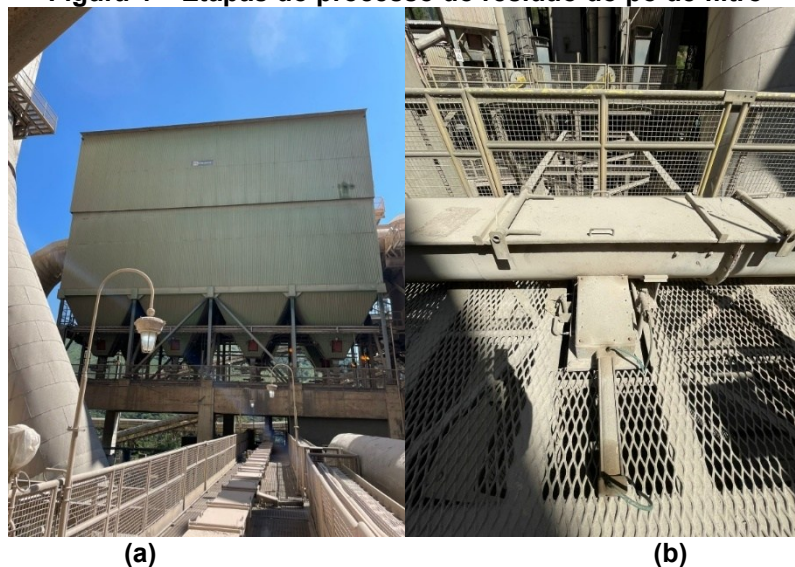


Fonte: Autoria própria (2025).

Estes filtros fazem parte do processo desde o início de produção da farinha até a produção de cimento. A fábrica que forneceu as amostras adaptou o uso em 3 caminhos para utilização deste resíduo: adição ao cimento, retorno na produção da farinha e na produção de clínquer.

Na Figura 4a, encontra-se o silo de resíduo do pó de filtro. Neste silo está o pó de filtro retido da etapa de produção da farinha. Na Figura 4b, encontra-se a central de comando que direciona onde será utilizado o resíduo.

Figura 4 – Etapas do processo do resíduo do pó de filtro



(a)

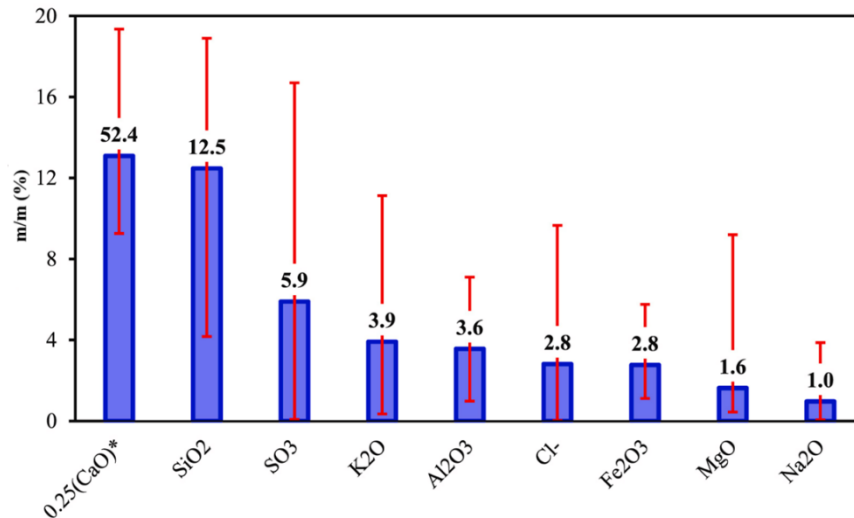
(b)

Fonte: Autoria própria (2025)

O silo indicado na Figura 4a tem capacidade de armazenamento de em torno de 6 mil ton./mês. Na central de comando é possível direcionar onde será destinado o resíduo conforme a capacidade instalada.

Segundo Adekunle (2024), pesquisas mostram a composição química retirada de vários artigos, conforme a Figura 5 abaixo.

Figura 5 – Porcentagens médias da composição química do pó de filtro



Fonte: Adaptado (Adekunle, 2024).

*Os dados e as barras de erro para CaO foram dimensionados por um fator de 0,25 para permitir a visibilidade de analitos com valores médios muito menores.

Poeira do filtro é um subproduto de granulação fina gerado na produção de cimento, composto principalmente de matérias-primas que não reagiram, fases de clínquer e sais alcalinos. Ele exibe propriedades físicas, químicas e mineralógicas distintas e, fisicamente, se assemelha a pó fino ou poeira. Quimicamente, é rico em óxido de cálcio, respondendo por 37 a 77% de sua composição, o que o torna um candidato potencial para captura e sequestro de carbono. Dióxido de silício (SiO₂) segue, entre 4 e 19%. Outros analitos constituem percentagens de massa mais baixas e menos significativas. Além disso, o pó de filtro pode hospedar quantidades importantes de sulfatos (SO₃) e cloretos (Cl⁻) (Adekunle, 2024).

2.3 Reologia

O cimento é um material muito utilizado pelo homem com diversas finalidades, e a reologia, ciência relativamente nova, contribui para a compreensão do comportamento mecânico desse material em determinadas aplicações (Tattersall, 1955).

A reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento dos materiais, sendo considerada um ramo da física e da físico-química, pois suas variáveis mais

importantes derivam da mecânica, como forças, deflexões e velocidades. O termo "reologia" tem origem no grego *rhein*, que significa "fluir", refletindo seu foco essencialmente no estudo do fluxo (Macosco, 1994). Segundo Mezner (2009), os experimentos reológicos não apenas revelam informações sobre o comportamento de líquidos em fluxo, mas também sobre a deformação de sólidos.

Os fluidos newtonianos são considerados fluidos ideais, pois apresentam propriedades bem definidas e seguem a lei criada por Newton para a viscosidade. Esses fluidos possuem a viscosidade variando com a temperatura e a pressão, entretanto, essa propriedade é constante quando se varia a deformação, a tensão aplicada sobre o líquido e o tempo. Apesar de ter características próximas da idealidade, representam uma grande variedade de fluidos em condições normais, como a água e o ar. A lei de Newton possibilita a compreensão do comportamento de fluidos sob escoamento dirigido por cisalhamento (Navarro, 1997).

Os fluidos não newtonianos, diferentemente dos ideais, não apresentam relação única entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento. Em geral, estes fluidos possuem viscosidade dependente da cinemática do escoamento. Os fluidos não newtonianos podem ser divididos em diferentes grupos, sendo classificados como inelásticos ou puramente viscosos, dependentes ou não do tempo, e viscoelásticos. Para compreender o comportamento de cada um desses fluidos, é necessário um estudo detalhado das suas propriedades em diversos tipos de escoamento para que seja possível traçar modelos que descrevam o comportamento de cada um deles. Desta forma, pode-se analisar sua aplicabilidade nos diversos procedimentos industriais e otimizar os processos envolvidos (Navarro, 1997).

A viscosidade expressa a resistência de um fluido ao escoamento por cisalhamento, ou seja, quando um fluido é submetido a uma tensão, se ele escoar de maneira rápida, é considerado pouco viscoso, como exemplo da água. O fluido que possui certa resistência ao escoar e, por isso, tem trabalhabilidade baixa, caracteriza-se como um fluido altamente viscoso, por exemplo, os óleos. A viscosidade pode ainda ser interpretada como resultado do atrito interno entre as partículas do fluido. A maior parte dos fluidos newtonianos tende a diminuir com o aumento da temperatura devido ao movimento browniano das moléculas constituintes, no entanto, para a pressão, à medida que esta diminui, a viscosidade também reduz (Fox et al., 2011).

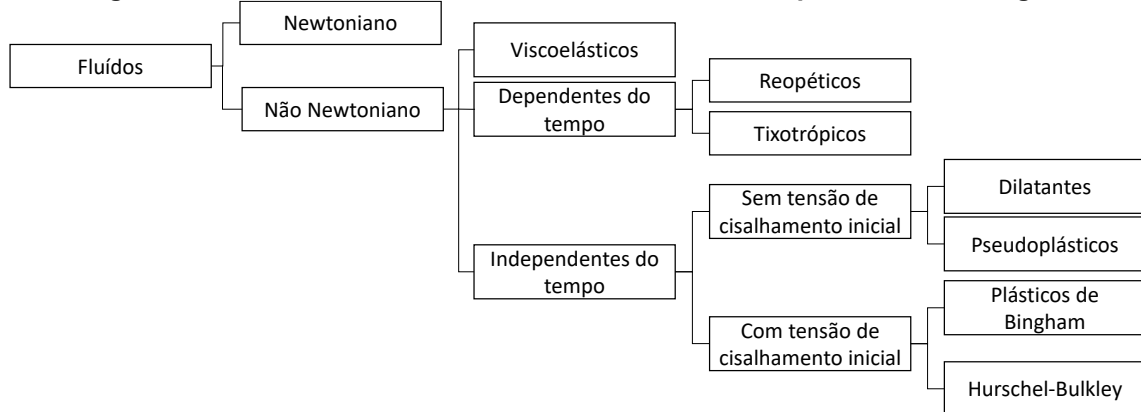
As misturas exibem comportamento viscoso após o início do fluxo, e a taxa de cisalhamento é proporcional à tensão de cisalhamento, sendo a constante de proporcionalidade denominada viscosidade plástica (Banfill, 1991). Em todos os casos, verifica-se uma natureza tixotrópica do material (ou seja, redução da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento) (Filho et al., 2020).

Os fluídos que apresentam comportamento tixotrópico têm como característica principal a dependência da viscosidade com o tempo de cisalhamento. Sua estrutura é quebrada à medida que o tempo transcorre, fazendo com que a viscosidade diminua, por isso suas propriedades são muito complexas e de difícil determinação. O comportamento tixotrópico é um fenômeno caracterizado pela redução da tensão de cisalhamento ao longo do tempo, enquanto a taxa de cisalhamento é mantida constante. Isto se deve à existência de uma estrutura instável no material, que pode ser rompida com uma determinada energia (Larrard et al., 1996). No cimento, ela é irreversível, uma vez que reações químicas contínuas modificam as propriedades do material com o tempo (Jarny et al., 2008).

Além de seu comportamento, os tipos de fluidos podem ser divididos conforme os materiais presentes neles. Os materiais podem ser divididos em duas características a partir de um conceito que relaciona taxa de deformação e tensão de cisalhamento, e podem ser classificados quanto à deformação. Assim, eles podem ser: a) Reversíveis (elásticos): utiliza a lei de Hooke (uma tensão aplicada a um corpo sólido causa uma deformação), possuem deformação reversível e não apresentam escoamento; b) Irreversíveis (viscosos): utiliza a lei de Newton (viscosidade constante), possuem deformação irreversível e apresentam escoamento (Barnes et al., 1989).

A Figura 6, explica o esquema de classificações dos tipos de fluidos a partir da divisão entre newtoniano e não newtoniano.

Figura 6 – Classificação dos fluídos de acordo com comportamento reológico



Fonte: Autoria própria (2025)

Ferraris; Obla; Hill, (2001) descrevem o escoamento da pasta de cimento por meio do modelo de Bingham, caracterizado pela tensão de escoamento e pela viscosidade plástica. Dependendo da composição da pasta e do grau de floculação das partículas, a tensão de escoamento pode assumir valores muito baixos, aproximando o comportamento reológico da pasta ao de um fluido newtoniano.

A pasta cimentícia consiste em uma suspensão concentrada de partículas de cimento em água, cujo comportamento reológico depende da composição do sistema e do grau de aglomeração ou dispersão do material particulado (Helene, Andrade, 2007). Segundo Macosco (1994), a reometria compreende um conjunto de técnicas experimentais utilizadas para determinar as propriedades reológicas dos materiais, como viscosidade, tensão de escoamento e comportamento tixotrópico.

Os modelos reológicos mais utilizados na descrição do comportamento de pastas cimentícias são os modelos de Bingham (48,0%), Herschel-Bulkley (37,0%) e Modified Bingham (6,0%) (Silvestro et al., 2024);(Mezger, 2009). Os modelos acima, bem como suas equações, constam na Tabela 1:

Tabela 1 – Principais modelos reológicos

Modelo	Equação
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}$
Herschel - Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$
Bingham modificado	$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma} + c \dot{\gamma}^2$
Casson	$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta \cdot c \cdot \dot{\gamma}}$

τ - tensão de cisalhamento (Pa), τ_0 - tensão de escoamento dinâmico (Pa), η – Viscosidade plástica (Pa.s), $\dot{\gamma}$ - taxa de cisalhamento (s^{-1}), K – parâmetro consistência, n – índice de fluxo, c – constante (sem significado físico)

Fonte: Autoria própria (2025)

O modelo de Bingham ou plástico ideal, é o modelo mais utilizados nos sistemas reológicos atuais. Segundo este, um plástico ideal requer a aplicação de uma tensão mínima (τ_L), denominada de limite de escoamento, para que haja alguma deformação cisalhante. Quando submetidos a uma tensão menor que (τ_L), os fluidos, teoricamente, comportam-se como sólidos. Em resumo, a equação que define o fluido Bingham é expressa por:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma} \text{ para } \tau > \tau_L$$

$$\dot{\gamma} = 0 \text{ para } \tau \leq \tau_L$$

O modelo de Herschel - Buckley, este modelo é também conhecido como fluido de potência com limite de escoamento ou fluido de potência modificado, e tem três parâmetros reológicos a serem levados em consideração. Por este motivo, é denominado também de modelo a três parâmetros, cuja equação que o define é a seguinte:

$$\tau = K (\dot{\gamma})^n \text{ para } \tau > \tau_0$$

$$\dot{\gamma} = 0 \text{ para } \tau \leq \tau_0$$

Este modelo em questão é mais completo do que os anteriores, uma vez que a sua equação associam três parâmetros, como visto, além do que, os modelos concentrados anteriormente (Bingham) podem ser analisados, perfeitamente, como casos particulares deste (Machado, 2002).

O modelo de Casson (com dois parâmetros ajustáveis), onde τ_0 e η são o valor de escoamento e a viscosidade a taxa de cisalhamento infinita, respectivamente. A equação, conforme Tabela 1, foi derivada supondo a agregação das partículas da fase dispersa em cadeias hipotéticas cujo comprimento depende das forças de interação entre as partículas e da tensão de cisalhamento. A equação de Casson não deve ser válida para suspensões muito concentradas pois não leva em consideração as interações entre as cadeias (Casson, 1959). Ela foi aplicada de forma insatisfatória a pastas de cimento por (Kesler, 1985). Estudos comparativos de modelos reológicos aplicados a pastas de cimento mostram que a escolha do modelo influencia diretamente os valores estimados de tensão de escoamento e viscosidade plástica. Modelos como Herschel–Bulkley frequentemente fornecem melhor ajuste em curvas não-lineares típicas de pastas cimentícias, enquanto modelos mais simples, como Casson, podem apresentar maior erro ou menor capacidade de captura de nuances do comportamento reológico em regiões de cisalhamento variado (Campos et al., 2021).

No ensaio a aplicação do procedimento de pré-cisalhamento ao fluido, submetendo-o a um histórico de cisalhamento controlado, é utilizada para garantir resultados consistentes ao trabalho (Fernandes; Andrade; Franco, 2017). O pré-cisalhamento estabelece um estado homogêneo das amostras antes do teste de reometria rotacional (Azevedo et al., 2021).

A taxa de cisalhamento do concreto depende das operações do processo (Papanastasiou, 1987), e a taxa de cisalhamento aplicada à pasta de cimento no interior do concreto é muito maior do que a experimentada pelo próprio concreto quando considerado um fluido homogêneo. A Tabela 2 tem algumas referências de taxa de cisalhamento referentes à aplicação (Roussel, 2006).

Tabela 2 – Taxa de cisalhamento máxima em várias etapas do histórico de vazão do concreto

Processos	Taxa de cisalhamento máxima aproximada (s^{-1})
Misturador	10 – 60
Caminhão misturador	10
Bombeamento	20 – 40
Moldagem	10

Fonte: Adaptado de Roussel (2006)

A maior taxa é atingida quando é utilizado o misturador, seguida do bombeamento.

2.4 Calor de hidratação

O calor de hidratação do cimento é um dos principais parâmetros que influenciam o desempenho térmico e a durabilidade de materiais cimentícios, especialmente em concretos de grande volume. Esse calor resulta das reações exotérmicas entre os compostos do clínquer e a água, sendo responsável pela elevação de temperatura interna durante o processo de hidratação. Quando não controlado, pode gerar gradientes térmicos significativos e tensões internas, resultando em fissuração precoce e redução da durabilidade da estrutura (Ullah et al., 2025).

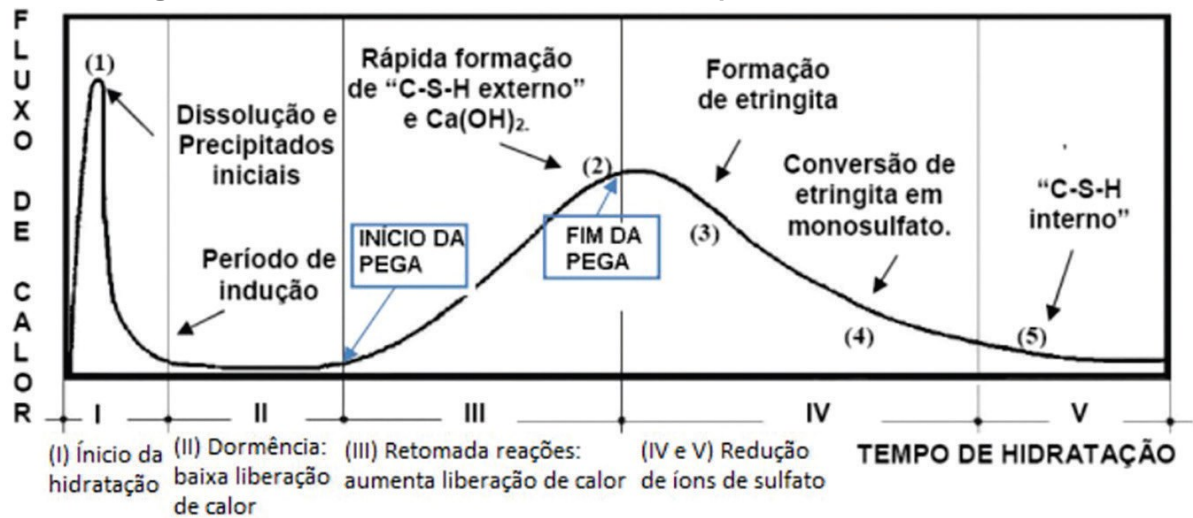
Os resultados obtidos do ensaio de calor de hidratação permitem avaliar a cinética das reações químicas que ocorrem durante as primeiros 24 horas, 48 horas a 72 horas de hidratação do cimento (Aleixo, 2011).

A calorimetria isotérmica é capaz de caracterizar a taxa de produção de calor de pequenas amostras em condições de temperatura constante. No caso da hidratação do cimento, o ensaio caracteriza a cinética de hidratação em função do tempo de amostras de pastas, argamassas ou microconcretos (desde que os agregados não influenciem na produção de calor). A taxa de calor gerado na amostra é medida por um sensor e a diferença entre o sinal da amostra e o sinal da referência gera a curva calorimétrica. É necessário que haja uma referência com aproximadamente as mesmas propriedades da amostra (especialmente calor específico), mas que não produza calor. Em seu trabalho Gerstig, M. e Wadsö (2010) discutem alguns materiais convenientes e um método para selecionar referências apropriadas.

A integração da curva calorimétrica permite determinar a curva de calor de hidratação acumulado. Quando pastas são preparadas antes de serem inseridas no calorímetro, a integração precisa começar imediatamente após o início do período de indução (primeiro crescimento da curva), resultando na exclusão da leitura do Estágio I, tipicamente nos 30 minutos iniciais (Gerstig e Wadsö, 2010; Scrivener, Snellings, Lothenbach, 2018; Wadsö, 2003). Caso contrário, o calor da mistura externa da pasta afetará os valores de calor de hidratação. Em comparação com outros métodos de calorimetria, a isotérmica apresenta algumas peculiaridades, por exemplo: o fluxo de calor é medido diretamente, enquanto nas calorimetrias semi-adiabáticas e adiabáticas, precisa ser calculado a partir das mudanças de temperatura. O valor de energia de ativação não é necessário para fazer o ensaio, no entanto, caso seja desejado, pode ser determinado com ensaios isotérmicos em diferentes temperaturas (Folliard, K. J.; Schindler, 2003). Na parte experimental, a estabilidade da temperatura e exatidão se tornam importantes devido ao caráter isotérmico do ensaio. Para a realização precisa do ensaio isotérmico, o equipamento deve estar em um ambiente com temperatura estável e possuir um termostato de alta precisão, o qual deve ser verificado com um termômetro calibrado.

Na Figura 7, pode-se observar que o processo de hidratação do cimento é dividido em cinco estágios distintos (Taylor, 1990).

Figura 7 – Evolução do calor de hidratação de pastas de cimento Portland



Fonte: Adaptado de TAYLOR (1990)

Os estágios da hidratação do cimento Portland comum geralmente incluem um período inicial de reação rápida, que dura apenas alguns minutos (Estágio I). Em seguida, ocorre um período de indução caracterizado por uma taxa de reação reduzida (Estágio II). Este é seguido por um período de aceleração, em que a taxa de reação aumenta gradualmente (Estágio III), e um período de desaceleração, marcado por uma redução progressiva na velocidade de reação (Estágio IV). Não há um limite claro para o fim do período de desaceleração, pois este se transforma gradualmente em um estágio de reatividade lenta e constante (Estágio V). O entendimento dos mecanismos que controlam a cinética de reação ao longo desses estágios, especialmente aqueles que determinam o fim do período de reação inicial (Estágio I) e o início do período de aceleração (Estágio III), ainda é um tema de análise (Dorn; Blask; Stephan, 2022).

Com base nas curvas geradas, é possível observar que no Estágio I durante o primeiro período de pré-indução, o silicato tricálcico (C_3S) e o aluminato tricálcico (C_3A) entram em contato com água e começam a reagir durante os primeiros 15 a 20 minutos (Giroto, 2018).

O início de pega corresponde ao término do período dormente (Estágio II), neste momento ocorre pequena elevação da temperatura. No entanto, é diferente dos estudos realizados por Taylor (1990); Mehta et al. (2014) e Neville (2013), que informam o fim de pega ocorrendo na máxima taxa de elevação de temperatura após o período de indução. Estágio II é conhecido como dormência ou indução, as taxas de reação do C_3S e C_3A diminuem, podendo estender-se por algumas horas. O sulfato

de cálcio hidratado presente nos cimentos comerciais, na fase etringita ($6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) começa a formar-se como principal produto de hidratação do aluminato tricálcico (C_3A).

No estudo verificou-se que o ponto de fim de pega corresponde ao fim do (Estágio III) ou período de aceleração, aproximadamente 1 hora após seu início. No Estágio III, ocorre a cristalização do hidróxido de cálcio (portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) e tobermorita ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot x\text{H}_2\text{O}$) formados a partir da hidratação do C_3S , sendo caracterizado o início de pega do material com a taxa de calor crescendo até seu valor máximo (Dweck et al., 2003).

Este resultado está próximo aos estudos realizados por Ramachandran, (1984) e Jawed & Skalny (1982), nos quais o fim de pega foi localizado na metade do período de aceleração.

O Estágio IV, chamado de pós-aceleração, é caracterizado por uma desaceleração da taxa de reação, e neste período há uma formação contínua de produtos de hidratação. Após a quarta fase, existe apenas uma lenta formação de produtos, por meio de reações de difusão controlada, caracterizada pelo Estágio V (Dweck et al., 2003).

Os conhecimentos sobre o mecanismo e a cinética de hidratação evoluíram com aplicação de técnicas recentes e com a consideração da solubilidade das fases constituintes do cimento. A produção de clínquer a partir de materiais alternativos e adições motivam a revisão dos conhecimentos de hidratação, dadas as substituições do clínquer que alteram a sua reatividade (Cincotto, 2022).

O tamanho das partículas do clínquer parece ser o principal fator que afeta a cinética de hidratação do cimento, com partículas finas (3–30 μm) apresentando uma forte correlação positiva com o calor cumulativo, enquanto partículas maiores (>45 μm) exibem uma correlação negativa notável com o calor de hidratação no primeiro dia (Andrade Neto et al., 2025b).

No estudo de materiais cimentícios suplementares (MCS) constituídos por misturas minerais de escória granulada de alto-forno e cinza volante, os resultados indicam que a incorporação desses materiais influencia o calor de hidratação. Esse efeito se manifesta por alterações na evolução térmica, com modificação da temperatura nas idades iniciais e formação de uma microestrutura mais densa e menos porosa (Xie et al., 2022). De forma complementar, Zhang et al. (2024) analisaram a evolução do calor de hidratação em cimentos com diferentes adições minerais, demonstrando

que a substituição parcial do clínquer por (MCS) reduz o pico térmico e o calor acumulado, contribuindo para o controle térmico e para a mitigação de fissuras em estruturas maciças.

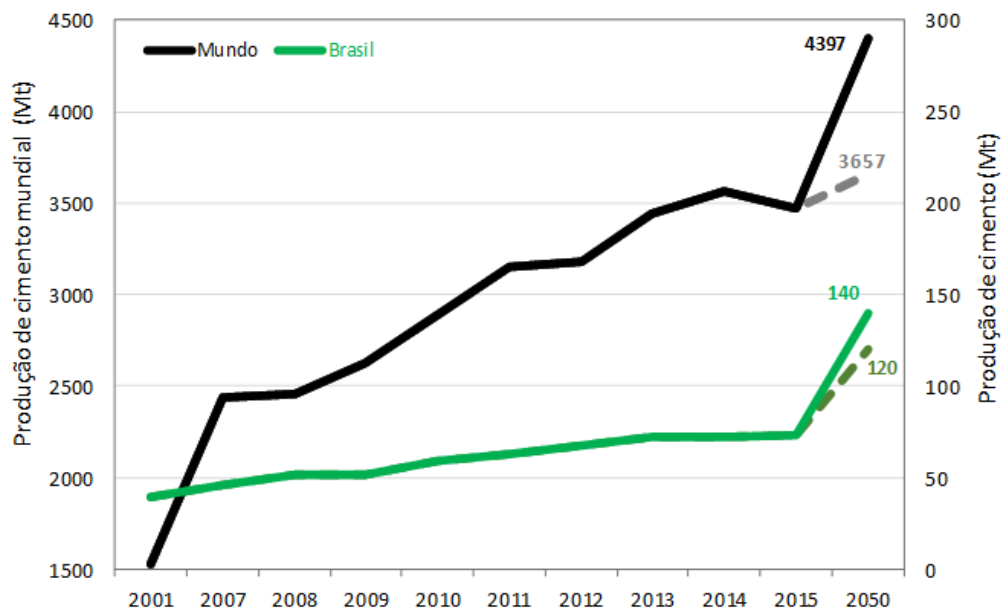
De forma semelhante, Liu et al. (2024) investigaram a influência do filer calcário e da argila calcinada no calor de hidratação e na microestrutura do cimento. Os resultados mostraram que essas adições modificam a cinética de hidratação, reduzindo o calor liberado nas primeiras idades e promovendo uma microestrutura mais densa em idades posteriores, devido às reações pozolânicas e ao efeito filer.

2.5 Sustentabilidade

A indústria cimenteira desempenha um papel crucial no desenvolvimento global da construção civil, contribuindo para os desafios ambientais, particularmente o aquecimento global. A produção de cimento é responsável por aproximadamente 8% das emissões globais de CO₂, principalmente devido aos seus processos intensivos em energia e à dependência de combustíveis fósseis e matérias-primas (IEA, 2023).

Na Figura 8, mostra-se a projeção de aumento de volume de produção de cimento no mundo e no Brasil.

Figura 8 – Produção de cimento até o ano de 2050 para o cenário brasileiro e mundial



Fonte: Adaptado de (Cembureau, 2016; SNIC, 2019)

O crescimento de consumo de cimento é devido as previsões que indicam o aumento populacional até 2064 (Vollset et al., 2020) e que 75% da população ocupará espaços urbanos em 2050 (Ellen Macarthur Foundation, 2019). Com isso, a velocidade do consumo dos recursos naturais se torna cada vez mais insustentáveis.

Durante o processo de fabricação do cimento, o CO₂ é emitido por diferentes fases:

- 50% do CO₂ é emitido pela calcinação do calcário (CaCO₃) em CaO e CO₂ (Gale et al., 2003; Worrel et al., 2001);
- 40% vem da queima de combustíveis fósseis para produzir energia térmica (Schneider, 2019b); e
- os 10% restantes de CO₂ são emitidos pelo transporte e pelo uso de eletricidade.

Embora várias estratégias de descarbonização visem atingir emissões zero até 2050, ainda falta uma organização estruturada e abrangente para avaliar e priorizar sistematicamente as medidas de melhoria de emissão de CO₂, alinhadas às metas globais e aos objetivos em nível de planta. Existem vários estudos e plataformas estratégicas de redução de CO₂ para indústria de cimento, como a GCCA (Associação Global de Cimento e Concreto), a IEA (Agência Internacional de Energia/International Energy Agency), o IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) e a CEMBUREA (Associação Europeia do Cimento) que fornecem avaliação de sustentabilidade, analisando o desempenho ambiental, social e de governança (ESG), e foi criada uma ferramenta específica para atender às necessidades de descarbonização das fábricas de cimento, cuja proposta se concentra em medidas de melhoria técnica, de processo e de redução de emissões na cadeia de valor, fornecendo *insights* viáveis, estratégias direcionadas e *benchmarks* de desempenho em relação aos padrões globais, permitindo o monitoramento das reduções de CO₂ (Khalil; Abouzeid, 2025).

A redução e/ou eliminação das emissões de CO₂ relacionadas à descarbonização do calcário nas indústrias de cimento (fabricação de clínquer) é crucial para reduzir as emissões industriais globais de CO₂ no mundo. Na transformação de calcário em portlandita com captura simultânea de CO₂, por exemplo, somente vapor de água será rejeitado durante a formação de silicatos de cálcio em alta temperatura (Montes-Hernandez, 2025).

A redução das emissões da indústria de cimento pode ser efetuada seguindo algumas propostas e avaliando o impacto desde o início do processo, cuja extração

emite 7%, o transporte até a fábrica 1,5%, no processo de produção, o combustível utilizado emite entre 35% e 50% no processo de transformação do clínquer, 5% na moagem e 1,5% no transporte do concreto (Imbabi; Carrigan; Mkenna, 2012). Uma das propostas existentes é a substituição parcial do clínquer, um componente de alta emissão de CO₂ devido às elevadas temperaturas de produção, por materiais como escória de alto-forno, cinza volante, argilas calcinadas e filer calcário, que são alternativas viáveis as quais permitem diversificar as propriedades do cimento (Da Silva, 2022). A indústria de cimento no Brasil demonstra uma forte tradição na incorporação de adições, utilizando subprodutos industriais e matérias-primas inovadoras há mais de cinco décadas. A fabricação de cimentos que incluem adições como escória de alto-forno, cinza volante, argilas calcinadas e filer calcário oferece o benefício de variar as aplicações e características do produto. Além disso, essa prática constitui uma solução ecologicamente responsável, transformando resíduos industriais em insumos valiosos e contribuindo para a preservação de recursos não renováveis, tudo isso em alinhamento com as rigorosas especificações das Normas Técnicas da ABNT NBR 16697.

Entre 1990 e 2014, o país alcançou uma notável redução na proporção clínquer/cimento, passando de 80% para 67%, o que posiciona o Brasil entre os líderes mundiais na utilização de adições (SNIC, 2019).

Outra abordagem envolve o uso de combustíveis alternativos em substituição aos fósseis, como as biomassas e o coprocessamento de resíduos (como oleosos, têxteis, serragem, resíduos de papel, pneus e subprodutos animais), os quais são exemplos com menor fator de emissão de CO₂, embora exijam controle rigoroso de suas características físico-químicas e da temperatura do forno (Windeurope, 2023; Cembureau, 2025). Além dos combustíveis fósseis tradicionais utilizados pela indústria do cimento, principalmente o coque de petróleo (85% da matriz térmica atual), é crescente no Brasil o uso de combustíveis alternativos, através do coprocessamento de resíduos e da utilização de biomassas. No período de 2000 a 2014, a indústria conseguiu aumentar a participação dos combustíveis alternativos em sua matriz energética de 9% para 15%, diminuindo suas emissões ao mesmo tempo em que reduziu o passivo ambiental representado pelos resíduos (SNIC, 2019).

A eficiência térmica e elétrica é igualmente crucial, dependendo do processamento de subprodutos, da manutenção de equipamentos e da tecnologia empregada.

Exemplos incluem a transição do processo de via úmida para via seca, a implementação de pré-aquecedores de múltiplos estágios para otimizar o aproveitamento de calor, a adição de pré-calcinadores e a utilização de moinhos verticais para matéria-prima, reconhecidos pelo seu baixo consumo elétrico (Schneider, 2019b). Com um parque industrial contemporâneo e em constante aprimoramento, a indústria do cimento no Brasil se destaca por sua eficiência. A quase totalidade de seus fornos foi convertida do processo via úmida para via seca entre 1970 e 1980 (com mais de 99% operando via seca atualmente). Somada à expansão da capacidade produtiva e aos investimentos contínuos em modernização tecnológica, essa evolução permitiu que o consumo de energia do setor fosse inferior ao da maioria das nações. Consequentemente, entre 1990 e 2014, a intensidade térmica foi reduzida em 17%, passando de 4,2 GJ/t para 3,5 GJ/t de clínquer. Já a intensidade elétrica demonstrou avanços mais modestos nesse intervalo, visto que o patamar de 113 kWh/t de cimento já se aproximava do benchmark global (SNIC, 2019).

Por fim, a adoção de tecnologias inovadoras e emergentes também é fundamental. Isso inclui a captura, utilização ou armazenamento de carbono, o emprego de membranas para absorção de CO₂ e a aplicação do ciclo do cálcio, onde o CO₂ dos gases de combustão reage com cálcio para formar carbonato de cálcio, que pode ser reincorporado na fabricação do cimento (Da Silva, 2022).

Um dos indicadores para o desenvolvimento da intensidade de CO₂ da indústria de cimento é o fator clínquer. Este parâmetro não permite uma ligação direta entre o desempenho ecológico e o desempenho técnico do cimento e do concreto (Schneider, 2019b).

É possível avaliar os principais KPIs (Key Performance Indicator), conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Indicador para indústria brasileira de cimento (KPI)

	2014	2030
Fator Clínquer (relação clínquer/cimento)	0,67	0,59
Consumo Térmico [GJ/t clínquer]	3,50	3,47
Consumo Elétrico [kWh/t cimento]	113	106
Combustíveis Alternativos [% da substituição térmica]	15%	35%
Emissão Bruta [Mt CO ₂ /ano]	40	42
Emissão Específica [t CO ₂ /t cimento]	0,56	0,48

Fonte: Adaptado IEA – Modelagem desenvolvida para este projeto (2016)

Principais órgãos têm estes indicadores como base para avaliação das projeções para 2050. O indicador fator clínquer é a relação clínquer por cimento produzido, com objetivo até 2030 de aumentar a produção de cimento com menor consumo de clínquer. O consumo térmico é uma redução focada em eficiência energética com melhorias em processo como, tecnologias mais avançadas (fornos com mais estágios de pré-aquecimento e pré-calcinadores) e o uso de combustíveis alternativos. O consumo elétrico tem um parque industrial moderno e eficiente, assim, não são esperadas mudanças significativas na eficiência energética até 2030, quando ocorreria a substituição gradual de unidades e equipamentos mais obsoletos por novas linhas utilizando as melhores tecnologias disponíveis (Roadmap Tecnológico, 2019). O indicador de combustíveis alternativos é a utilização de combustíveis alternativos como fonte de energia térmica em substituição aos combustíveis fósseis (WBCSD, 2014). A emissão bruta de CO₂ é expressa em milhões de toneladas métricas por ano, emissões voltam a apresentar queda a partir de 2022, devido condições climáticas extremamente favoráveis para a geração hidrelétrica. Com excelentes níveis de chuvas e grande quantidade de hidreletricidade sendo produzida, foi possível diminuir a participação de fontes fósseis na matriz elétrica brasileira, levando o país a bater recordes: a variação positiva da geração hidrelétrica entre 2021 e 2022 foi a maior da série histórica (+18%), enquanto a queda da geração termelétrica também foi a maior já observada entre dois anos (-49%) (SEEG, 2023). A emissão específica de CO₂ na produção de cimento, medida em toneladas de CO₂ por tonelada de cimento (tCO₂/t cimento), varia dependendo do país, tecnologia e matérias-primas utilizadas (ABCP, 2022).

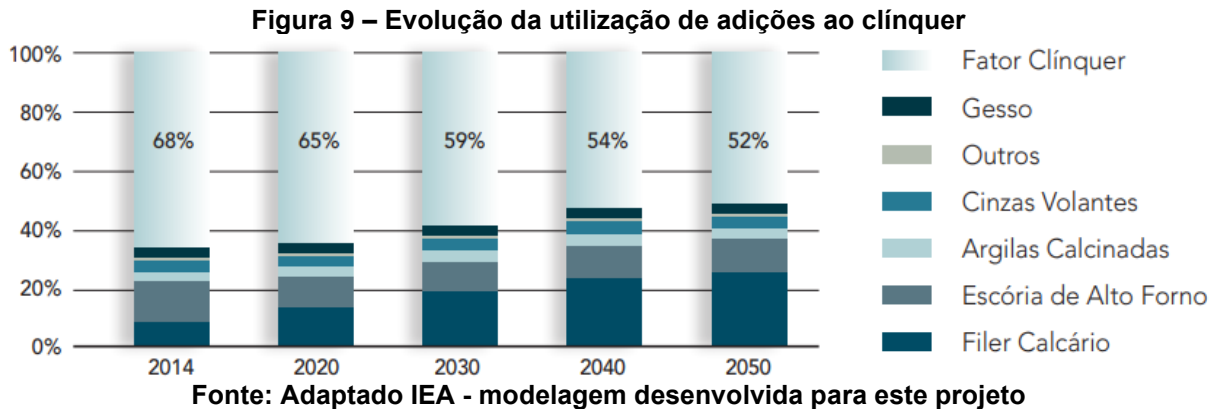
2.6 Materiais Cimentícios Suplementares

Para reduzir a emissão de carbono da indústria de cimento, materiais cimentícios suplementares (MCS) são amplamente utilizados para substituir o cimento, como pozolanas naturais, escória granulada de alto-forno moída, cinza volante, argila calcinada, etc. (Ayub et al., 2021); (Gupta; Chaudhary, 2022).

A efetividade dessa estratégia requer que os materiais atendam a requisitos de viabilidade econômica, disponibilidade e viabilidade técnica. Embora escória de alto-forno e cinza volante sejam os materiais suplementares mais comuns atualmente, o crescimento da produção de cimento superou a oferta desses materiais. Diante

disso, a indústria tem incorporado outros materiais suplementares, como as pozolanas naturais e artificiais (Abrão, 2019).

Em um cenário de redução da disponibilidade de escórias e cinzas volantes, o grande potencial do setor para reduzir ainda mais a fração de clínquer no cimento está no maior uso de filer calcário (SNIC, 2019), conforme Figura 9.



Dentre os 10 maiores produtores globais de cimento, a China com produção de cimento de 2100 Mt aparece na primeira posição, seguido de Índia em 410 Mt e Vietnã em 210 Mt. O Brasil é o 7º maior produtor global e 1º da América Latina com uma produção de 63 Mt em 2023 (Statista, 2024).

As melhorias no concreto com materiais cimentícios suplementares (MCS) são atribuídas ao aumento da formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) resultante das interações pozolânica entre o hidróxido de cálcio (portlandite) e estes materiais MCS (Sasanipour; Aslani, 2019);(Kapoor; Singh; Singh, 2016).

Todos os anos, o mundo produz milhões de toneladas de pó de filtro, a maioria das quais acaba em aterros sanitários. Esses resíduos causam poluição ambiental, bem como contaminação das águas subterrâneas pelas chuvas (Siddique et al., 2016). Parham et al. (2017), por meio de uma pesquisa de laboratório, afirma que foi examinada a adição do pó tanto ao concreto convencional quanto ao concreto leve. De acordo com seus resultados, a adição de quantidades específicas de pó de filtro resultou em aumentos na resistência, mas diminuiu a trabalhabilidade e o módulo de elasticidade no concreto. Eles concluíram que a quantidade adequada de pó de filtro para uso em concreto convencional e leve é de 10% em substituição ao cimento (Shoaei et al., 2017).

(Murtaza et al., 2024) analisou o pó de forno de cimento nas seguintes condições:

- (a) funil V; (b) trabalhabilidade; (c) Resistência; (d) Teste de ciclo de congelamento e descongelamento; (e) Módulo de elasticidade dinâmico; (f) Penetração rápida de cloreto; (g) Profundidade penetração; (h) Ensaio de carbonatação acelerada; (i) Estrutura dos poros e (j) Durabilidade.

Análise do comportamento do resíduo pó de forno de cimento, segundo estudo (Murtaza et al., 2024), conforme Tabela 4:

Tabela 4 – Resultado do comportamento pó de forno de cimento (CKD)

Material suplementar	Trabalhabilidade (Slump flow / T₅₀)	Resistência à compressão	Resistência a ciclos de gelo-degelo	Penetração de cloretos	Carbonatação	Porosidade
Pó de forno de cimento (CKD)	Elevada trabalhabilidade (≈ 700 mm), alta trabalhabilidade	Alta resistência inicial, com crescimento contínuo	Desempenho moderado	Baixa carga passante; boa resistência à penetração de cloretos	Alta profundidade de carbonatação (≈ 16 mm)	Elevada porosidade capilar; comportamento hidráulico/pozolânico

Fonte: Adaptado (Murtaza et al., 2024)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, assim como, os métodos e procedimentos realizados.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados são o cimento CPV ARI e o pó de forno de cimento (CKD).

Serão analisados os materiais CPV ARI (REF), CPV ARI + adição 1% (REF1), CPV ARI + adição 3% (REF3), CPV ARI + adição 4% (REF4), CPV ARI + adição 5% (REF5), CPV ARI + adição 6% (REF6), CPV ARI + adição 7% (REF7) e o adição (AD).

As amostras foram fornecidas pela planta de produção de cimento em Adrianópolis/PR.

Na Tabela 5, constam as quantidades utilizadas nas amostras para os lotes de teste. As amostras dos lotes foram produzidas pela fábrica com a seguinte especificação:

Tabela 5 – Composição das amostras

Amostras	Clinker	Gesso	Calcário	Cinza	Pó
REF	81,92	4,09	11,99	2,00	0,00
REF1	83,94	4,10	8,96	2,00	1,00
REF3	82,00	4,40	8,60	2,00	3,00
REF4	82,02	4,30	7,68	2,00	4,00
REF5	82,00	4,30	6,70	2,00	5,00
REF6	81,97	4,07	5,96	2,00	6,00
REF7	81,98	4,07	4,95	2,00	7,00

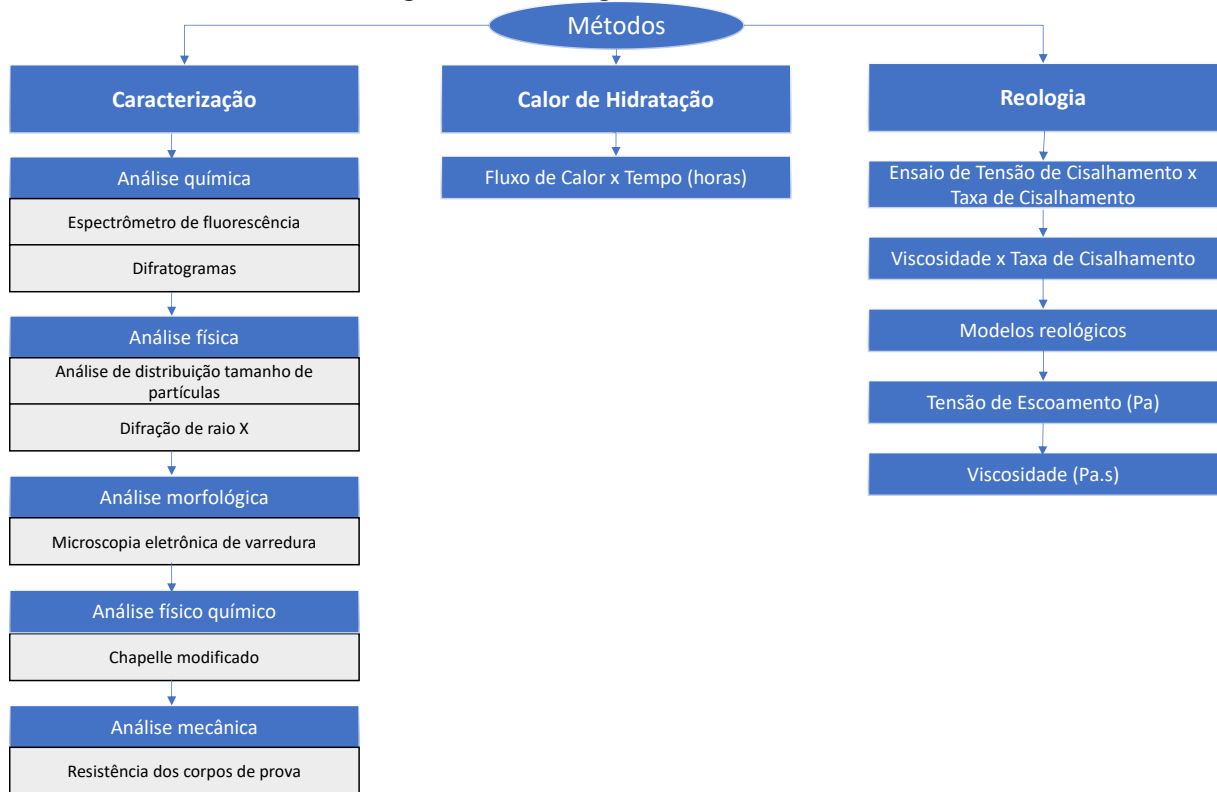
Fonte: Autoria própria (2025)

Nas amostras que foram acrescentado o pó de filtro, foi realizada uma redução gradual no filer calcário, mantendo 100% nas amostras dos lotes.

3.2 Métodos

A seguir, na Figura 10, apresenta-se o fluxograma das etapas realizadas dos ensaios de caracterização, ensaios de calor de hidratação e ensaios de reologia.

Figura 10 – Fluxograma dos métodos



Fonte: Autoria própria (2025)

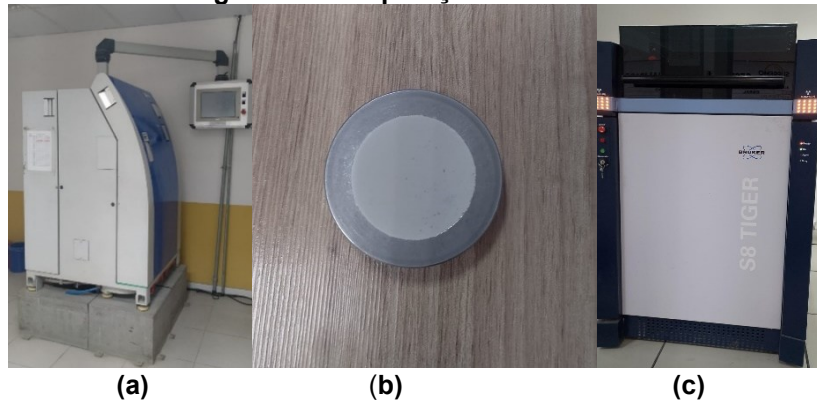
3.2.1 Caracterização

3.2.1.1 Análise química

3.2.1.1.1 *Espectrômetro de fluorescência*

As caracterizações químicas são realizadas pelo ensaio de espectrômetro de fluorescência, o equipamento utilizado é (XRF) Bruker, modelo S8 Tiger. As amostras, previamente secas e moídas, foram preparadas pelo método de fusão com fundente à base de tetraborato/metaborato de lítio, na proporção de 1:10, formando pastilhas vítreas. As análises foram realizadas por (XRF) com tubo de raios X de ânodo de ródio, sob atmosfera de vácuo ou hélio, permitindo a quantificação dos principais óxidos presentes. Os dados foram tratados por software específico, com calibração baseada em padrões certificados para materiais cimentícios. Na Figura 11, (a) Equipamento Centaurus; (b) Pastilha e (c) XRF.

Figura 11 – Preparação de amostras



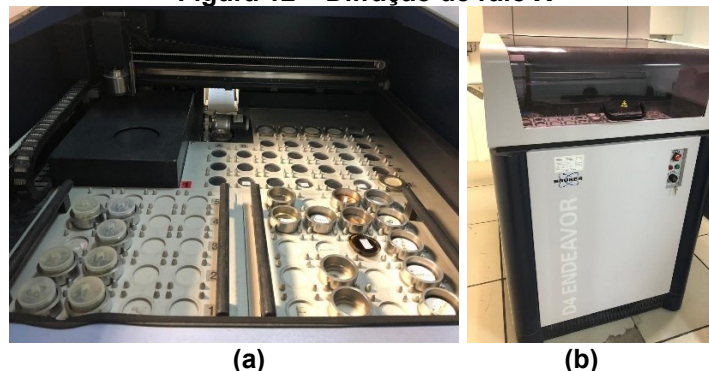
Fonte: Autoria própria (2025)

3.2.1.2 Análise física

3.2.1.2.1 Difração de raio X

As caracterizações físicas são realizadas pelo ensaio de difração de raio X, com o equipamento D4 Endeavor, utilizando radiação Cu-K α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), operando a tensão de 40 kV e corrente de 40 mA. As análises foram conduzidas em geometria Bragg–Brentano (θ – 2θ), com varredura angular na faixa de 5° a 70° (2θ), passo de $0,02^\circ$ e tempo de contagem de 1s por passo, em temperatura ambiente. Utilizado conforme Figura 12, (a) Pastilhas e (b) Raio X.

Figura 12 – Difração de raio X

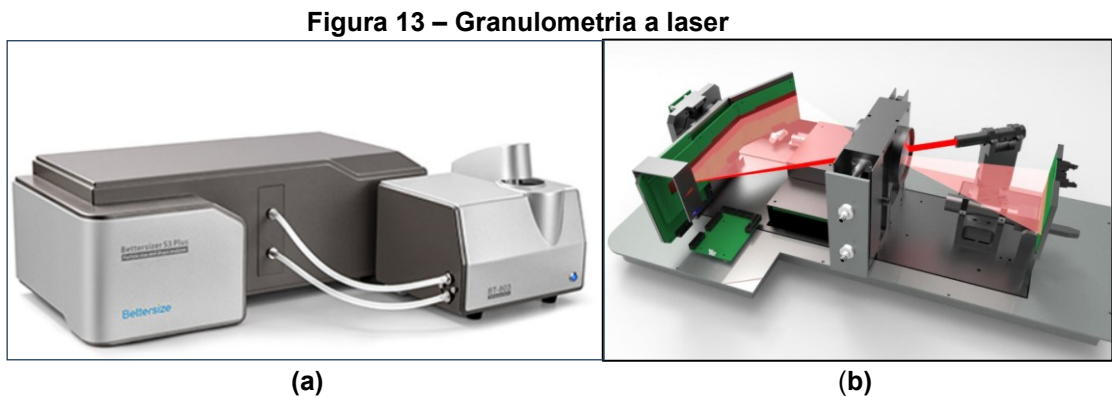


Fonte: Autoria própria (2025)

As pastilhas são preparadas pelo equipamento Centaurus atendendo as suas especificações.

3.2.1.2.2 Granulometria a laser

Foram realizados os ensaios de análises de distribuição de tamanhos de partículas com o equipamento de granulometria a laser, modelo laser BETTERSIZER/S3 PLUS. As amostras foram previamente secas e dispersas em meio líquido adequado, com auxílio de agitação mecânica e ultrassônica, de modo a garantir a desaglomeração das partículas. As análises foram conduzidas em temperatura ambiente, com controle da concentração e da obscuração do feixe. Os dados obtidos foram tratados por software específico, fornecendo a distribuição granulométrica e os parâmetros D10, D50 e D90. Segundo a Figura 13, (a) Analisador de formato e tamanho de partícula e (b) Difração a laser.



Fonte: Site <https://www.bettersizeinstruments.com/products/bettersizer-s3-plus/> (2025)

É uma técnica avançada e amplamente utilizada para determinar a distribuição do tamanho de partículas em uma amostra.

3.2.1.3 Análise morfológica

3.2.1.3.1 Microscopia eletrônica de varredura

Foram utilizados os ensaios de microscopia eletrônica de varredura, com equipamento Zeiss, modelo EVO MA 15, realizado no laboratório de Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da UTFPR, para analisar a morfologia. As amostras

foram previamente secas, fixadas em suportes metálicos com fita condutiva de carbono e metalizadas com uma fina camada de ouro para garantir a condutividade elétrica. As análises foram conduzidas em modo de alto vácuo, com tensão de aceleração variando entre 10 e 20 kV, utilizando detectores de elétrons secundários e retroespalhados para a obtenção de imagens morfológicas e composicionais. Conforme Figura 14.

Figura 14 – Microscópio eletrônico de varredura



Fonte: Autoria própria (2025)

3.2.1.4 Análise físico-químico

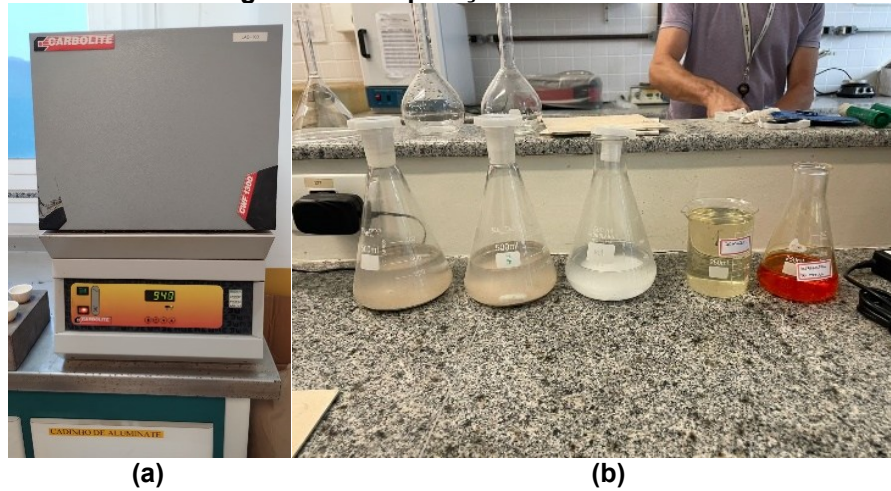
3.2.1.4.1 Chapelle modificado

As caracterizações de reatividade do resíduo de pó de filtro são realizadas pelo ensaio de Chapelle modificado, Norma (NBR 15895, 2010). Foram utilizados os equipamentos abaixo:

- Frascos preparados com amostras (Figura 15 b);
- Banho-maria com agitação tipo Dubnoff (Figura 16 a);
- Balança com resolução de 0,001 g;
- Estufa capaz de manter a temperatura no intervalo de $(90 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C})$;

- Mufla capaz de manter a temperatura no intervalo de $(1000 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C})$, equipamento CWF 130 (Figura 15 a)
- Pipeta com adição de fenolftaleína (Figura 16 b).

Figura 15 – Preparação das amostras



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 16 – Ensaio Chapelle modificado



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2025)

3.2.1.5 Análise mecânica

3.2.1.5.1 Resistência dos corpos de prova

As medições de resistência à compressão foram realizadas aos 1, 7 e 28 dias, seguindo os procedimentos e diretrizes da norma brasileira NBR 7215 (NBR 7215,

2019). Para este ensaio, argamassas com proporção 1:3:0,4 (cimento: areia padronizada: água) foram misturadas e moldadas em corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Após um período de cura ao ar de 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e imersos em água saturada com cal até o momento do ensaio.

Na Figura 17, (a) Moldagem dos corpos de prova 5x10 cm e (b) Tanque de cura térmica.

Figura 17 – Corpos de prova

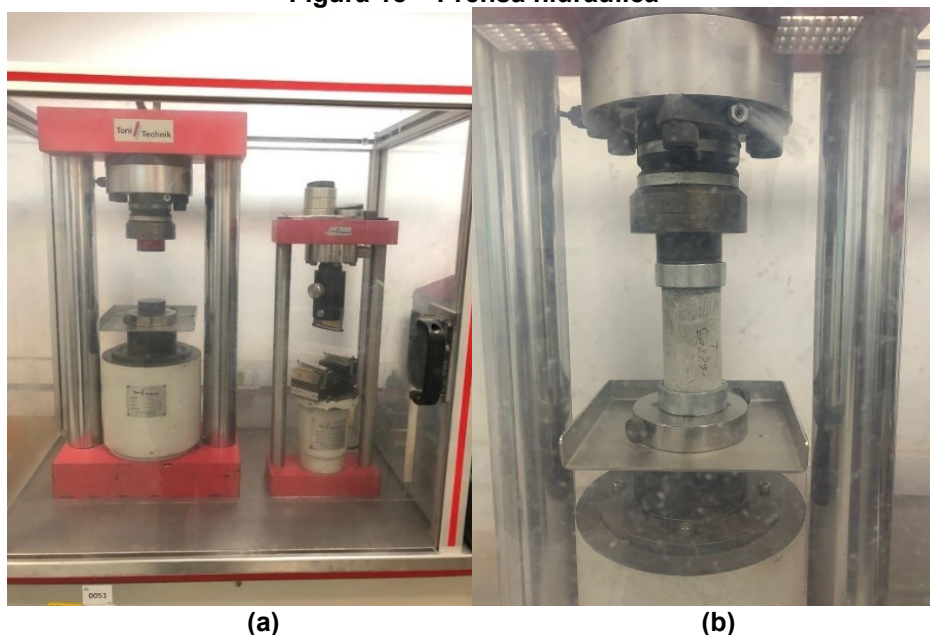


Fonte: Autoria própria (2025)

As caracterizações de resistência são realizadas pelo ensaio de rompimento do corpo de prova, utilizada uma prensa hidráulica Toni Technik, carga de 200 kN.

Na Figura 18, consta o equipamento de análise de resistência (prensa hidráulica). Imagem (a) Modelo da prensa e (b) Rompimento do corpo de prova.

Figura 18 – Prensa hidráulica



Fonte: Autoria própria (2025)

3.2.2 Calor de hidratação

O ensaio de calor de hidratação da pasta de cimento é fundamental para entender o comportamento do material durante sua fase inicial de endurecimento, que pode variar de acordo com tipo de cimento, aditivos utilizados e condições ambientais.

O equipamento de calor de hidratação modelo TAMair foi utilizado no laboratório de nanotecnologia da UFSC, conforme Figura 19 abaixo.

Figura 19 – Equipamento de calor de hidratação

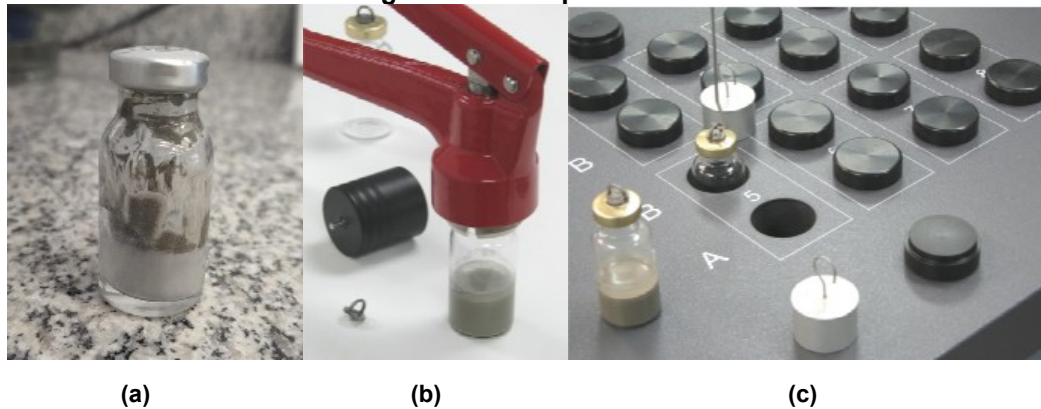


Fonte: Autoria própria (2025)

O equipamento de calorimetria isotérmica que usa um sistema de termostato a ar para manter a temperatura estável, permitindo a medição precisa da taxa de calor liberado em reações. Ele pode ser configurado com 8 canais para amostras menores (20 mL).

Mostra-se a preparação das amostras para realização dos ensaios de calorimetria de condução isotérmica. Imagens da Figura 20: (a) amostras do modelo das ampolas utilizadas, (b) equipamento para conformar a tampa e a (c) colocação das ampolas nos canais.

Figura 20 – Recipiente



Fonte: Autoria própria (2025)

Primeiramente, o calorímetro foi calibrado e sua linha de base estabilizada por 30 minutos. A temperatura do sistema foi mantida constante em $25 \pm 0,01^\circ\text{C}$ durante todo o período de aquisição dos dados. O recipiente da amostra contém 7 gramas (cimento + água), misturada manualmente com uma haste metálica

As amostras utilizadas para o ensaio de calor de hidratação foram preparadas inicialmente pesando na balança de precisão de 0,001 gramas, 5 gramas de cimento + 2 gramas de água adicionados (relação a/c = 0,4) diretamente no frasco, misturando manualmente durante 2 minutos com uma haste metálica. Após 2 minutos, preparou-se o calorímetro para receber a amostra e iniciar a medição em 5 minutos após a mistura da água destilada. O ensaio foi programado para 72 horas.

3.2.3 Reologia

A Figura 21 apresenta a imagem do Misturador Makita RT0700C de alta eficiência, usado no laboratório de Nanotecnologia da UFSC.

O protocolo de mistura utilizado na preparação de pastas de cimento. Ele deve ser suficientemente intenso e prolongado para desagregar todos os aglomerados de partículas, mas também deve ser controlado para evitar o efeito inverso, especialmente quando a formulação da pasta inclui aditivos químicos (Rubio-Hernández, 2018).

Figura 21 – Misturador de alta eficiência



Fonte: A autoria própria (2025)

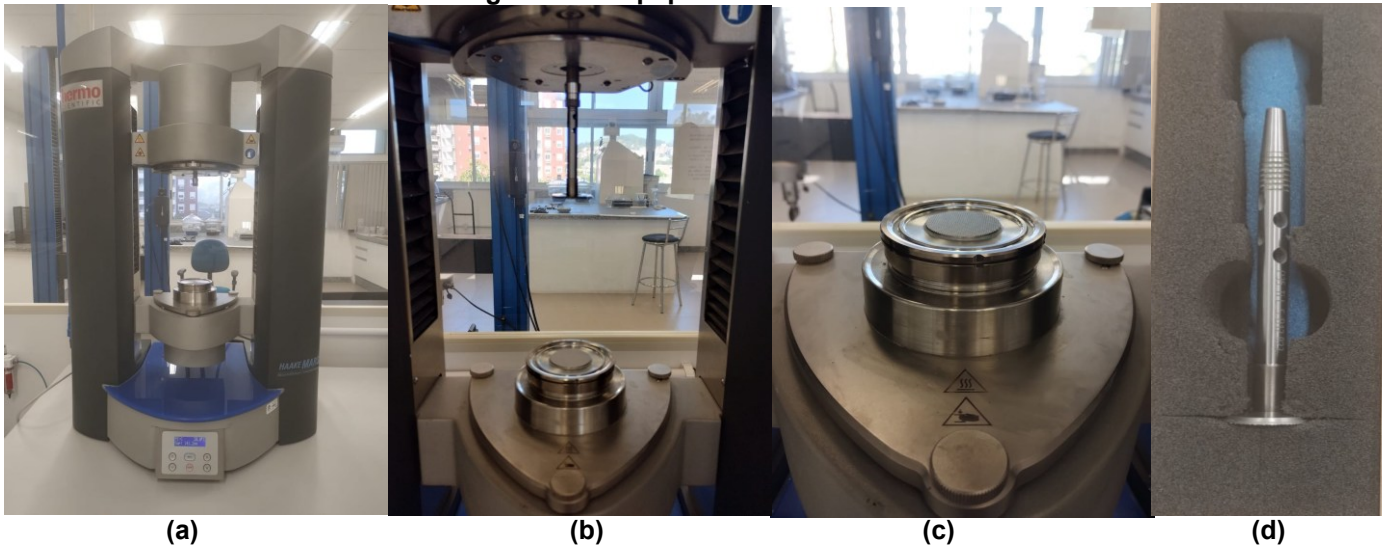
Foi utilizada a balança de precisão para pesar 100 gramas de cimento e 40 gramas de água, resultando em uma razão água/cimento de 0,4.

Para a mistura dos componentes, foi utilizado o misturador de alta eficiência, começou-se com 30 segundos de mistura manual. Em seguida, utilizou-se o misturador de alta eficiência ajustado para uma rotação de 0 a 10.000 RPM e misturou-se por 2 minutos. Após essa etapa, fez-se uma nova mistura manual por 30 segundos. Finalmente, a mistura retornou ao misturador de alta eficiência, mantendo as rotações de 0 a 10.000 RPM, e misturou-se por mais 2 minutos. O tempo total dedicado à tarefa foi de 5 minutos.

O equipamento de reometria utilizado foi Thermo Haake Mars no laboratório de Nanotecnologia da UFSC.

Na Figura 22, estão a imagem (a) Reômetro Thermo Haake Mars, imagem (b) haste utilizando a geometria paralela de 35 mm fixa no reômetro, imagem (c) base rugosa e (d) haste de geometria paralela de 35 mm.

Figura 22 – Equipamento de reometria

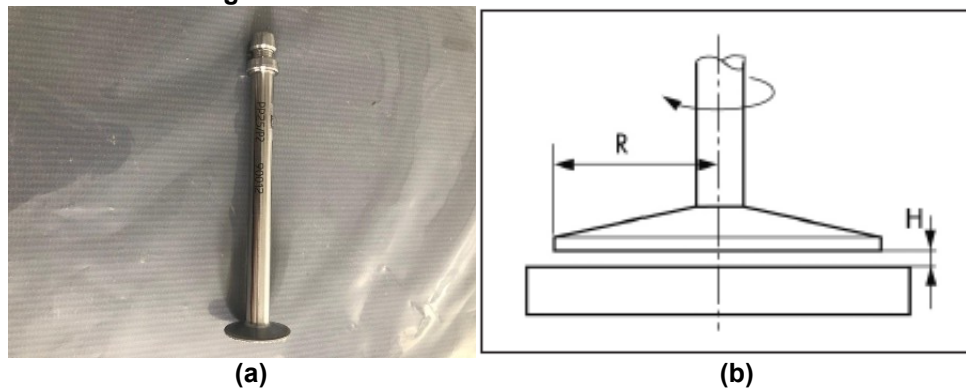


Fonte: Autoria próprio (2025)

Pode-se observar o equipamento pronto para iniciar os ensaios com o posicionamento da haste com a placa plana.

Na Figura 23, (a) modelo da haste de geometria paralela de 35 mm e imagem (b) vista da haste, R (diâmetro = $35 \text{ mm}/2$) = $17,5 \text{ mm}$, $H=1 \text{ mm}$ (GAP = distância da base rugosa).

Figura 23 – Geometria cross hatched de 35 mm



Fonte: Autoria próprio (Adaptado 2025)

O ensaio rotacional de fluxo começou com 10 minutos após a mistura e o período de reserva. Foi iniciado com a aplicação de pré-cisalhamento. Aplicar um procedimento de pré-cisalhamento ao fluido, submetendo-o a um histórico de cisalhamento controlado, é uma abordagem amplamente utilizada para garantir resultados consistentes ao trabalho. O pré-cisalhamento estabelece um estado homogêneo das amostras antes do teste de reometria rotacional.

A rotina de testes foi a seguinte:

- (i) pré-cisalhamento de 100 s^{-1} durante 60 s;
- (ii) descanso por 60 s;
- (iii) aumento da taxa de cisalhamento de 0,1 para $100,0 \text{ s}^{-1}$ em 10 etapas da curva de fluxo (ascendente);
- (iv) diminuição da taxa de cisalhamento de $100,0$ para $0,1 \text{ s}^{-1}$ nos mesmos pontos (curva de fluxo descendente). Uma taxa de cisalhamento constante foi aplicada durante 10 s e os últimos 3 s foram medidos para garantir um estado estacionário na leitura da tensão de cisalhamento (Wallevik et al., 2015; Silvestro et al., 2024b).

Neste estudo dos modelos reológicos foi realizado ajuste na curva descendente.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Caracterização das amostras

4.1.1 Análise química

As análises de caracterização e composição foram utilizadas nos equipamentos respectivos, ensaio de difração de raio X e fluorescência de raio X realizados e fornecidos pela fábrica.

Na Tabela 6, é possível observar que a amostra REF/REF1/REF3/REF4/REF5/ REF6/REF7 apresentaram resultados dos ensaios químicos próximos, enquanto AD teve um comportamento diferente devido a ter partículas bem menores.

Seguem os resultados químicos do cimento com adições (REFs) e o pó de filtro (AD).

Tabela 6 – Ensaios químicos

Análise Química		REF	REF 1	REF 3	REF 4	REF 5	REF 6	REF 7	AD	NBR 16997
Perda ao Fogo	%	6,17	4,88	4,84	4,77	6,13	6,01	6,23		≤6,6
Resíduo Insolúvel	%	2,84	2,73	2,45	2,68	2,46	2,12	2,09		≤3,5
Óxido de Silício	% SiO ₂	17,75	18,01	18,15	18,61	18,53	18,23	17,45	10,05	
Óxido de Alumínio	% Al ₂ O ₃	4,27	4,35	4,45	4,63	4,68	4,56	4,31	3,98	
Óxido de Ferro	% Fe ₂ O ₃	3,18	3,22	3,12	3,18	3,04	3,24	3,24	2,00	
Óxido de Cálcio	% CaO	56,84	56,96	57,67	57,81	57,97	57,45	56,48	41,90	
Óxido de Magnésio	% MgO	5,42	5,49	5,84	5,80	5,83	5,68	5,35	3,64	≤6,5
Sulfatos	% SO ₃	2,06	1,93	2,25	2,17	2,46	2,06	1,94	0,45	≤5,5
Óxido de Potássio	% K ₂ O	0,92	0,91	0,92	0,96	0,94	0,95	0,92	0,83	
Óxido de Sódio	% Na ₂ O	0,15	0,15	0,15	0,16	0,15	0,16	0,15	0,11	
Cloretos	% Cl	0,006	0,007	0,006	0,008	0,007	0,009	0,008	0,190	
Anidrido Carbônico	% CO ₂	3,80	2,85	3,69	3,57	4,29	3,57	3,95		≤5,5
Cal Livre	%	1,78	1,49	1,40	1,56	1,56	1,68	1,84		
Fator de Saturação da Cal		100,06	98,80	99,24	96,92	97,65	98,18	100,73	122,86	
Módulo de Sílica		2,38	2,38	2,40	2,38	2,40	2,34	2,31	1,68	
Módulo de Alumina		1,34	1,35	1,43	1,45	1,54	1,41	1,33	1,90	

Fonte: Autoria própria (2025)

Verificando isoladamente a amostra AD, sendo um resíduo do processo inicial de captura da transformação em clínquer, é possível observar que existe em comum os mesmos óxidos. Conforme estudo bibliográfico constatado um teor maior em cloretos.

Também foi realizada uma análise química para determinar os compostos existentes no clínquer de cada mistura, conforme indicado na Tabela 7:

Tabela 7 – Ensaios mineralógicos

Análise Mineralógica	Bogue	REF	REF1	REF3	REF4	REF5	REF6	REF7
Silicato Tricálcico	% C ₃ S	55,05	57,68	54,44	56,22	53,84	56,43	57,08
Silicato Bicálcico	% C ₂ S	7,66	8,42	8,93	8,30	8,68	7,53	6,07
Aluminato Tricálcico	% C ₃ A	3,47	4,08	3,35	3,64	3,47	3,54	3,92
Ferro-aluminato Tetracálcico	% C ₄ AF	10,82	9,89	9,97	10,48	9,33	10,38	10,12
C-S-H	% -	48,85	51,58	49,66	50,36	48,96	49,75	48,79
CH	% -	28,46	29,90	28,44	29,17	28,09	29,10	29,11

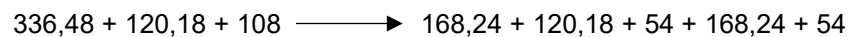
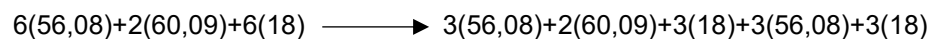
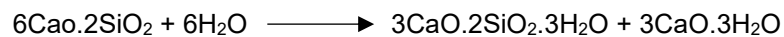
Fonte: Autoria própria (2025)

Nos resultados do ensaio mineralógico é possível observar variações nas quantidades de compostos formados no processo de clínquerização, porém essas variações são, de maneira geral, inferiores a um desvio padrão em relação à média dos resultados para cada composto.

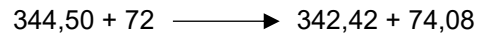
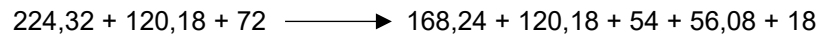
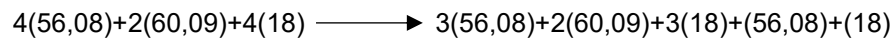
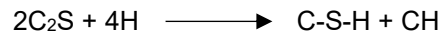
Também foi realizado um cálculo estequiométrico para estimar a quantidade de C-S-H e de CH formados em cada uma das amostras, a partir da massa atômica de cada elemento químico.

Os elementos químicos envolvidos nessa reação são o cálcio (Ca), oxigênio (O), sílica (Si) e hidrogênio (H), que possuem as massas atômicas de 40,08 u.m.a., 16 u.m.a., 28,09 u.m.a e 1 u.m.a. Esses elementos químicos se combinam formando CaO, com massa atômica de 58,08 g/mol, que corresponde à soma das massas atômicas do Ca com O, SiO₂ com massa atômica de 60,09 g/mol e H₂O com massa atômica de 18,00 g/mol.

A reação do C₃S com H₂O é dada por:



A reação do C_2S com H_2O é dada por:



Ao se realizar o cálculo estequiométrico para determinar a quantidade de C-S-H e de CH formado foi possível observar que na amostra de referência é formado 48,8% de C-S-H e 28,5% de CH e com uma média entre os compostos de 49,7% e 28,9% para o C-S-H e o CH, respectivamente e apenas a amostra REF1 teve percentuais superiores à média mais um desvio padrão, todas as demais misturas obtiveram uma variação inferior a um desvio padrão em relação à média.

Os difratogramas ilustrados das Figuras 24 a 30 representam os valores acumulados na concentração das alita (C_3S), belita (C_2S), celite (C_3A) e ferrita (C_4AF).

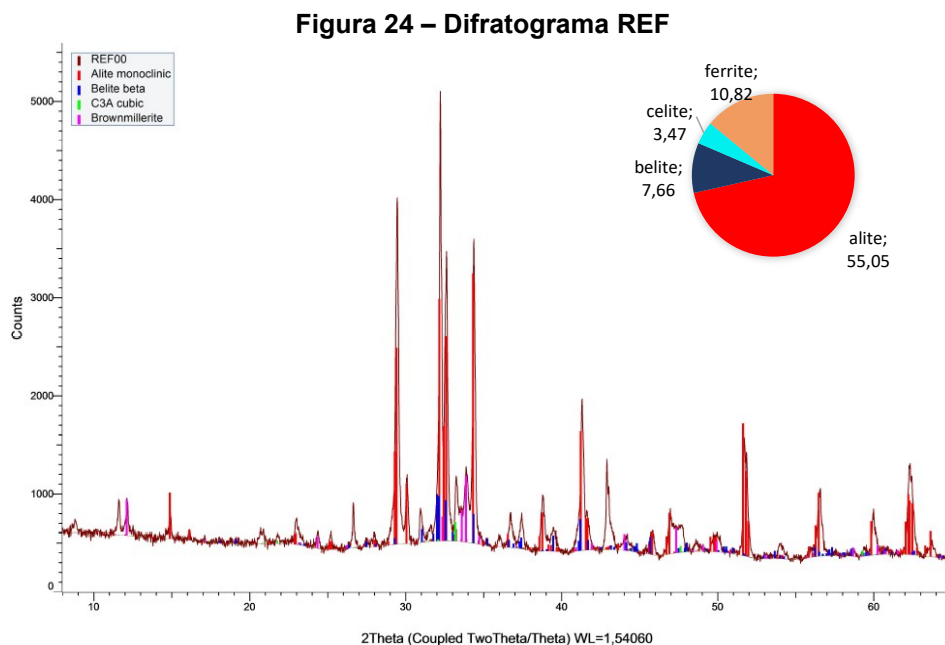
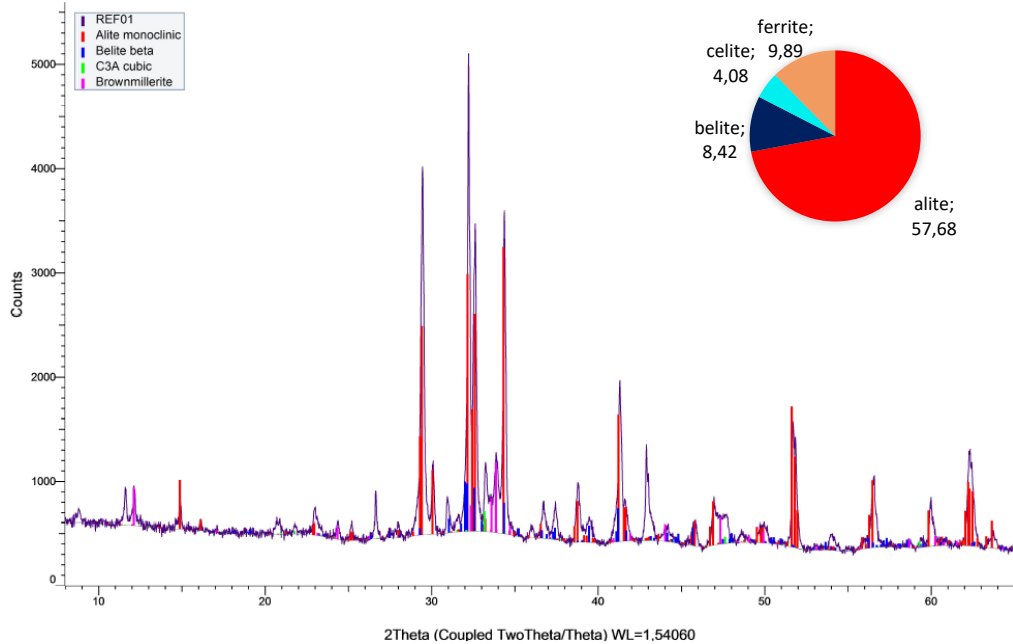
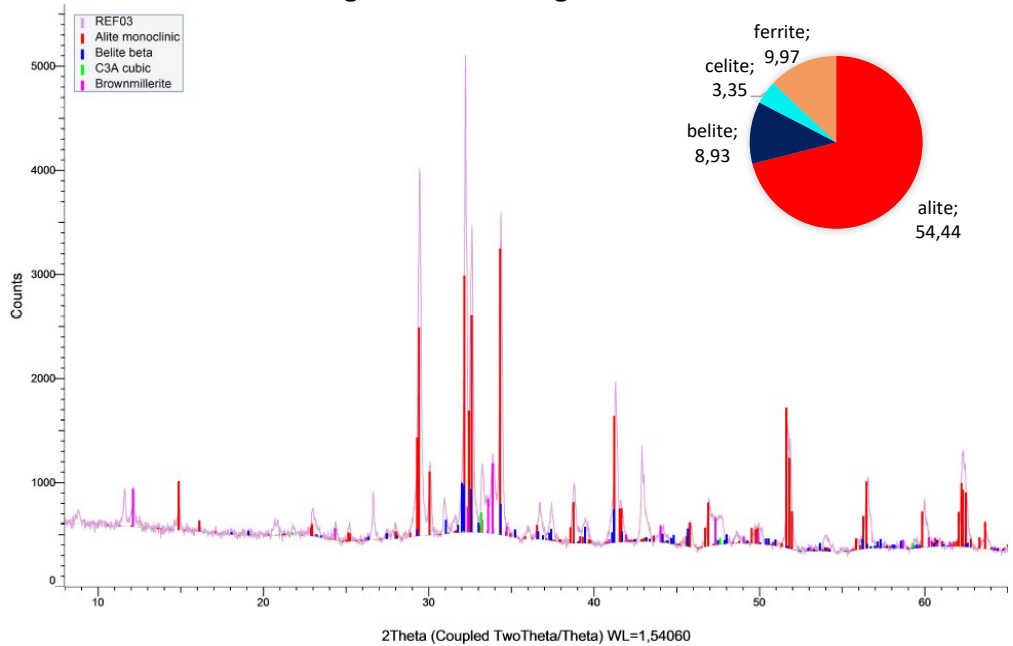


Figura 25 – Difratoograma REF1



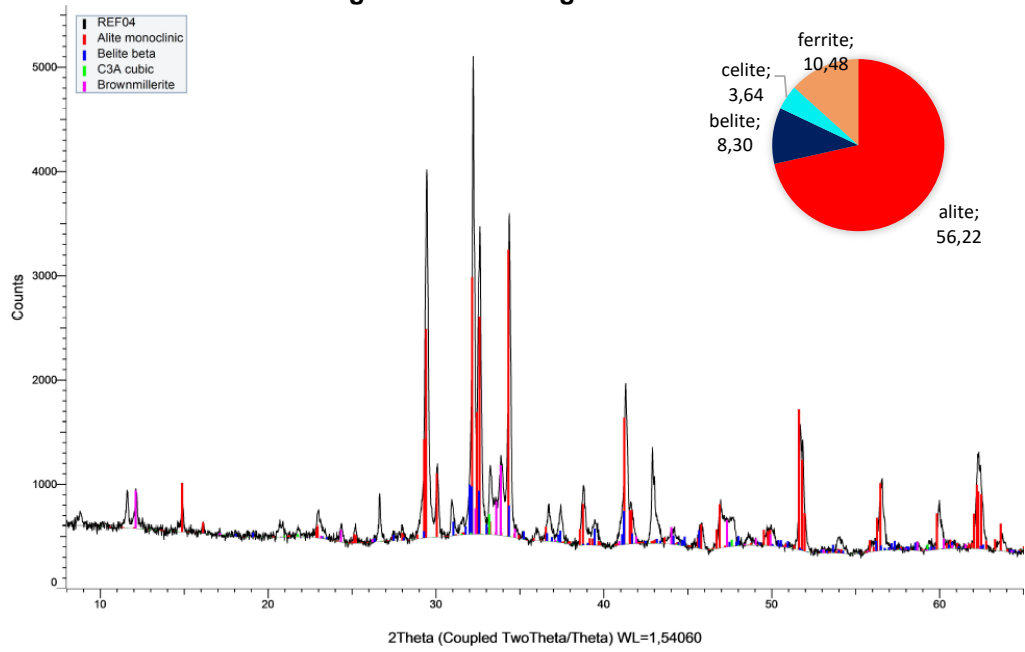
Fonte: Aatoria própria (2025)

Figura 26 – Difratoograma REF3



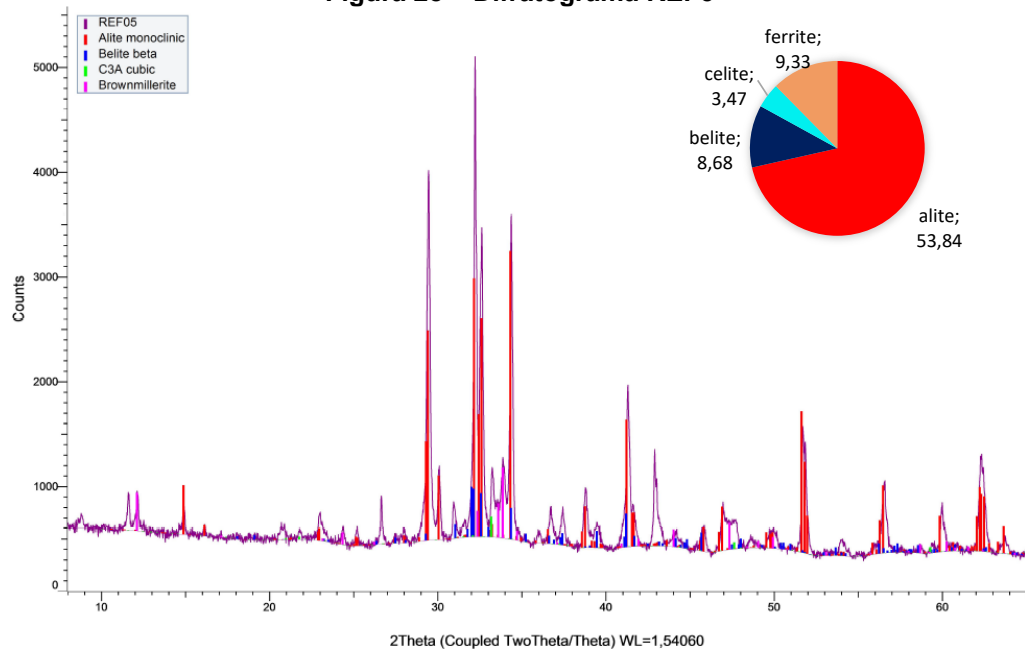
Fonte: Aatoria própria (2025)

Figura 27 – Difratoograma REF4



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 28 – Difratoograma REF5



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 29 – Difratoograma REF6

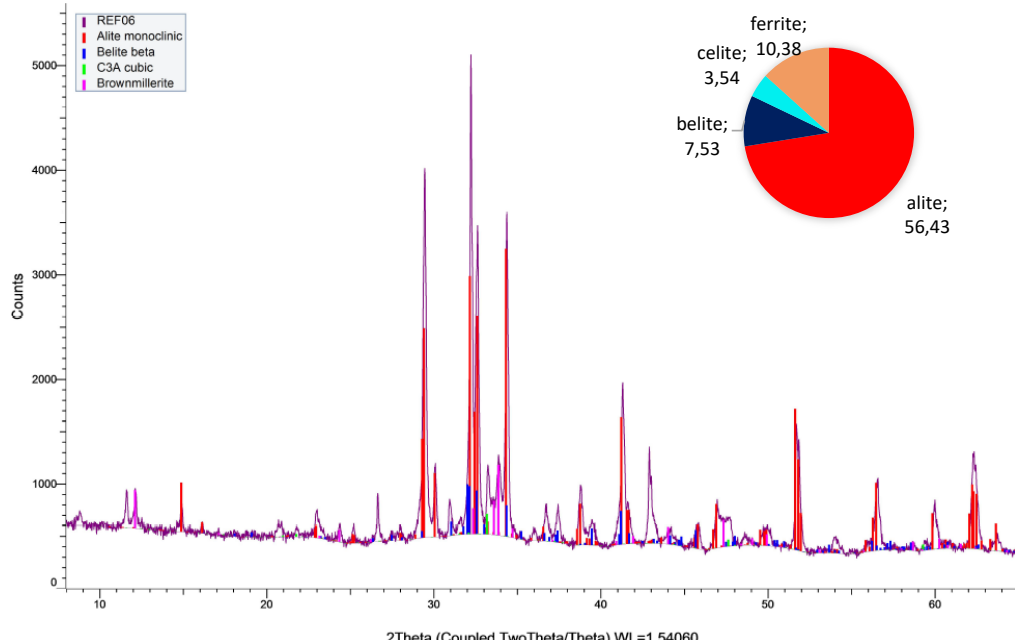
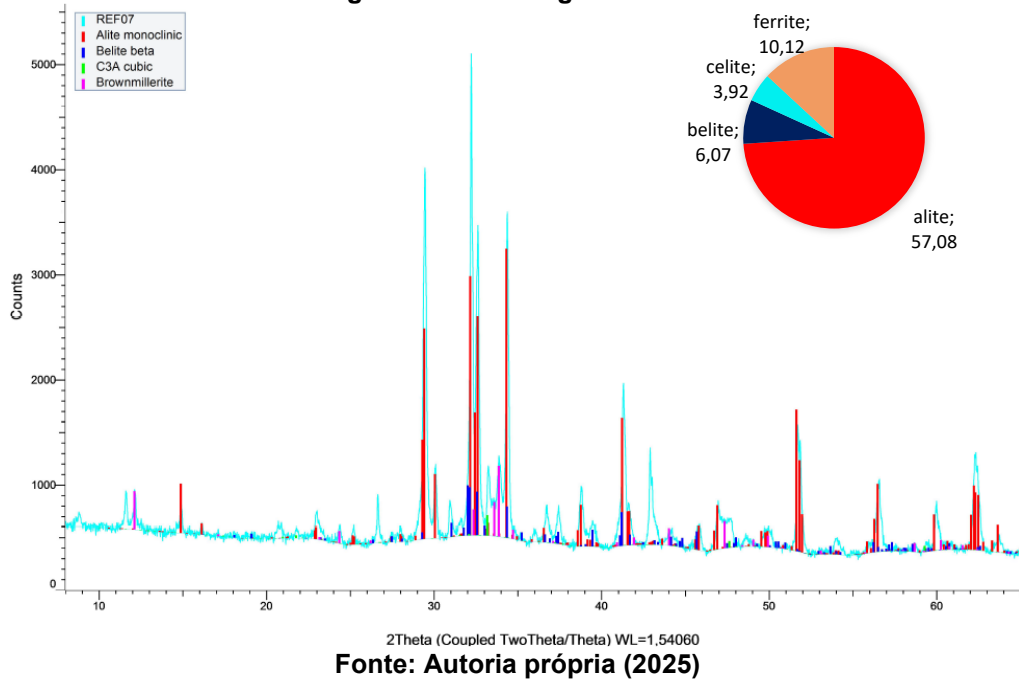


Figura 30 – Difratoograma REF7



No difratograma, é possível a identificação dos picos cristalinos, indicando a presença das seguintes fases mineralógicas: alita, belita, celite e ferrita. Como pode ser observado, de modo geral, o resíduo não apresenta influência na formação dos compostos do clínquer.

4.1.2 Análise física

Na Tabela 8 são apresentados os resultados físicos que atendem à norma NBR 16697, 2018.

Tabela 8 – Ensaios físicos

Ensaios Físicos	REF	REF1	REF3	REF4	REF5	REF6	REF7	AD	NBR 16697
Massa específica (g/cm ³)	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	
Sup. específica de blaine (cm ² /g)	4390	4240	4730	5010	5210	4600	4630	10500	≥3000
Água na pasta normal (%)	29,60	29,70	29,40	29,60	29,70	29,70	29,80		
Tempo de pega (min)	Início	265	241	250	250	265	279	275	
	Fim	330	306	315	316	330	344	330	≤600

Fonte: Autoria própria (2025)

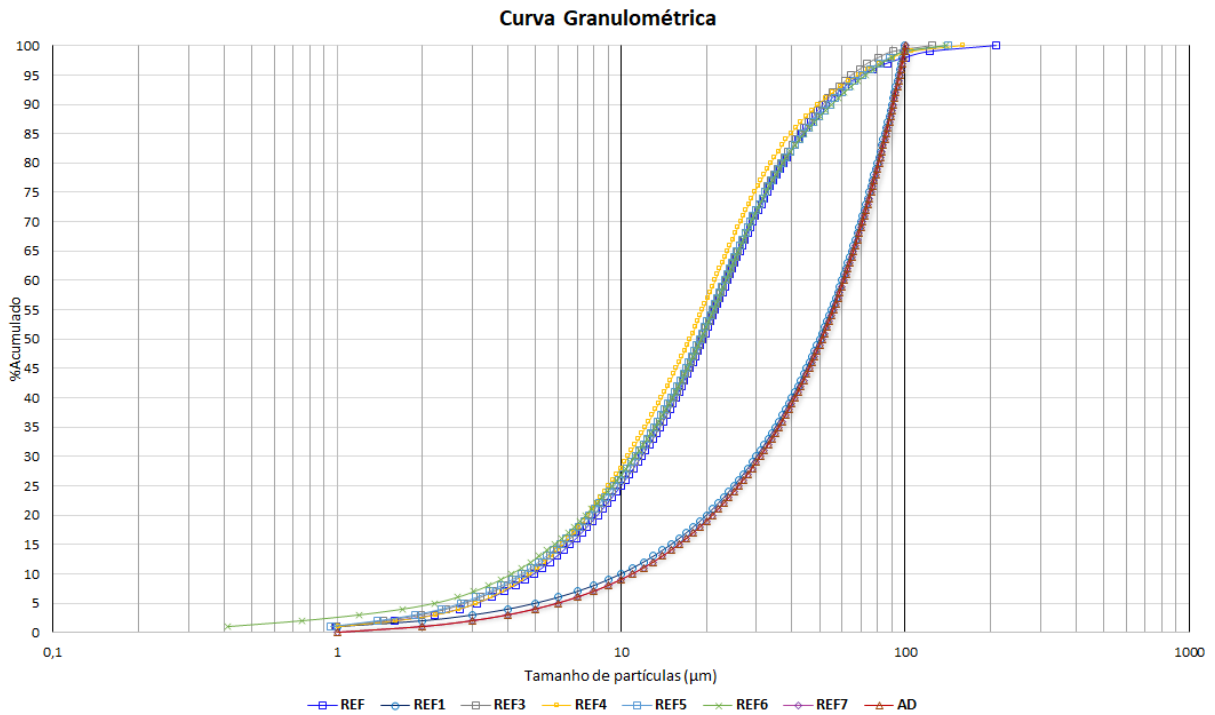
Os resultados não apresentam variações ao analisar a massa específica. Em relação à superfície específica, é possível observar um aumento do blaine na amostra REF5 de 16% em relação ao REF. REF6 e REF7 ficaram praticamente com a mesma superfície específica e menor em 11% referente à REF5. A mostra REF1 teve um comportamento muito diferente dos demais com diminuição da superfície específica.

Os materiais com adição possuem uma área superficial específica mais elevada (Lea, 1970) e, conseqüentemente, maior superfície volumétrica e fator de forma que os outros cimentos. Estes indicadores são determinantes para a necessidade sobre a demanda de água do material. Partículas com área superficial específica elevada, forma angular, valores de fator de forma acentuados ou alta porosidade interna, por exemplo, exigiram um maior volume de água para obter um comportamento reológico específico.

Foi observado, nas amostras REF1/REF3/REF4, o tempo de pega, no qual houve uma antecipação tanto do tempo inicial como final. REF5 teve o mesmo resultado que a REF, no entanto a amostra REF6 apresentou um leve retardo.

Na Figura 31, é possível avaliar a granulometria do cimento com as adições.

Figura 31 – Granulometria a laser



Fonte: Autoria própria (2025)

É possível analisar que as curvas REF1, REF7 e AD estão apresentando parâmetros próximos. A amostra REF1 teve um efeito de aglomeração corroborando com as informações visualizadas no MEV. As amostras REF3, REF4, REF5 e REF6 estão muito próximas na REF.

Segue na Tabela 9, o diâmetro das partículas D10, D50 e D90:

Tabela 9 – Diâmetro das partículas (µm)

Amostras	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)
AD	1,317	8,591	36,480
REF	4,942	19,400	52,800
REF1	5,382	16,100	38,260
REF3	4,595	19,150	51,360
REF4	4,782	17,480	49,430
REF5	4,466	18,920	54,360
REF6	4,116	19,100	55,250
REF7	4,824	16,800	41,710

Fonte: Autoria própria (2026)

O diâmetro médio D50 indica o tamanho médio predominante das partículas, D10 (fração fina) e o D90 (fração grossa).

Na análise do D50 é possível concluir que a amostra AD é cerca de 2,2 vezes mais fina que a REF. As amostras REF, REF3, REF5 e REF6 possuem granulometria muito semelhante. As amostras REF1, REF4 e REF7 mostram refinamento parcial.

O D10 indica o tamanho das partículas mais finas da distribuição permitindo observar que AD é 1,32 μm e as demais amostras ficaram entre 4,1 e 5,4 μm .

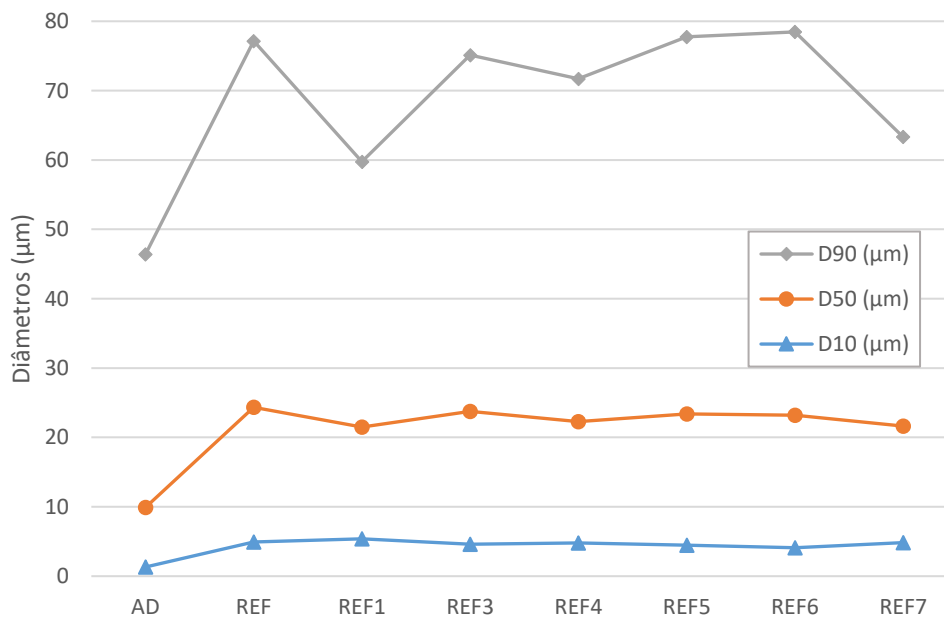
A amostra AD possui fração ultrafina muito superior, o que indica maior área específica, maior capacidade de preenchimento de vazios e maior reatividade potencial.

O D90 indica o tamanho das partículas maiores, onde AD é 36,48 μm e REF e similares ficaram entre 49 e 55 μm .

A amostra AD possui menor presença de partículas grossas e as amostras REF mantêm um comprimento granulométrico mais extensa.

Na Figura 32, comparação dos diâmetros característicos.

Figura 32 – Comparação dos diâmetros característicos (D10, D50 e D90)



Fonte: Autoria própria (2026)

É possível avaliar a diferença entre amostras finas, intermediárias e grossas e a similaridade de algumas amostras.

Segue o comparativo entre as amostras para cada classificação, conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Análise comparativa dos diâmetros característicos das amostras

	Tendência	Amostras mais finas	Amostras intermediárias	Amostras mais grossas	Análise
D10	Fração fina das partículas	AD	REF6, REF5, REF3, REF4	REF, REF7, REF1	A amostra AD apresenta maior quantidade de partículas ultrafinas, indicando maior área específica e maior potencial de preenchimento dos vazios da matriz.
D50	Diâmetro mediano da distribuição	AD	REF1, REF7, REF4	REF5, REF6, REF3, REF	A amostra AD apresenta granulometria significativamente mais fina. As amostras intermediárias indicam refinamento parcial em relação à referência.
D90	Fração mais grossa da distribuição	AD	REF1, REF7, REF4	REF3, REF, REF5, REF6	A amostra AD apresenta menor presença de partículas grossas, sugerindo melhor empacotamento e distribuição mais refinada.

Fonte: Autoria própria (2026)

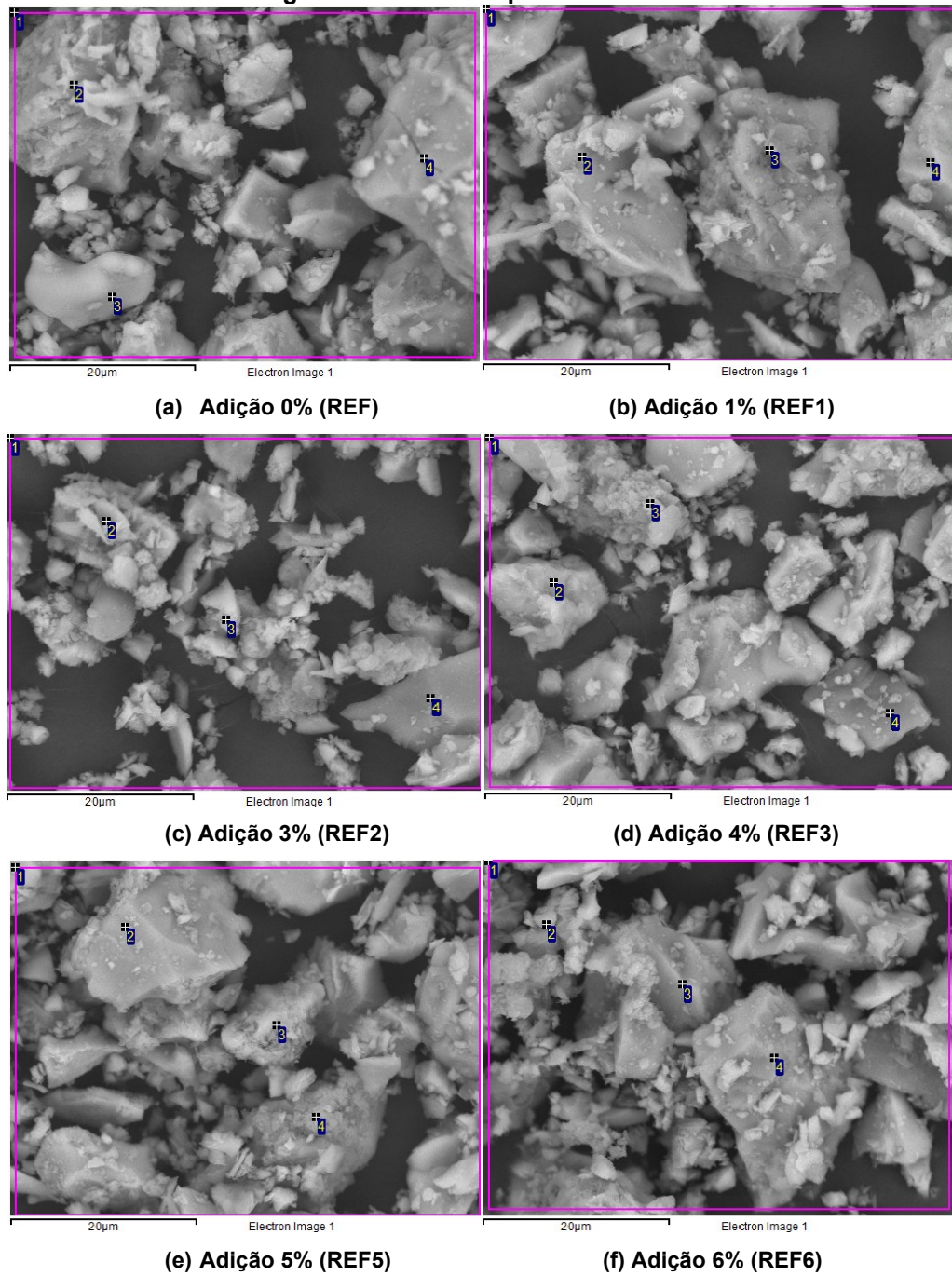
A análise dos parâmetros granulométricos D10, D50 e D90, conforme Tabela 10 demonstra que a amostra AD apresenta distribuição significativamente mais fina em relação às demais, evidenciada pelos menores valores desses diâmetros característicos. A redução do D10 indica maior presença de partículas ultrafinas, o que contribui para o preenchimento dos vazios entre os grãos maiores, promovendo melhor empacotamento das partículas. De forma complementar, os menores valores de D50 e D90 indicam uma redução geral do tamanho médio e da fração de partículas mais grossas, resultando em uma matriz mais densa e homogênea.

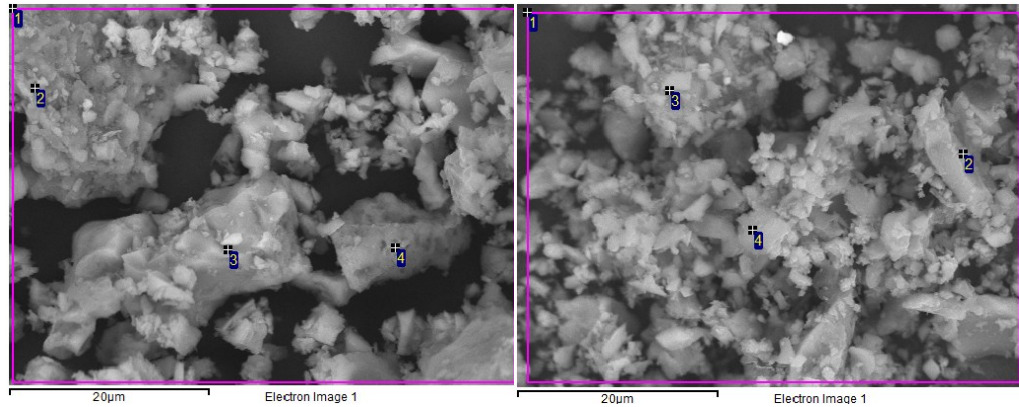
Esse refinamento granulométrico tende a aumentar a área específica do material, favorecendo as reações de hidratação e, conseqüentemente, o desenvolvimento da resistência mecânica. Além disso, a melhor distribuição das partículas contribui para a redução da porosidade e da permeabilidade da matriz, fatores diretamente relacionados ao aumento da resistência à compressão. Assim, amostras com menores valores de D10, D50 e D90 tendem a apresentar melhor desempenho mecânico, enquanto as amostras de referência, com granulometria mais grossa e distribuição semelhante entre si, apresentam comportamento menos favorável em termos de resistência.

4.1.3 Análise morfológicas

No ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), observa-se que o pó de filtro ocupa os vazios da matriz, promovendo o preenchimento dos poros e, conseqüentemente, o aumento da área superficial específica do material, conforme Figura 33.

Figura 33 – Microscópio de varredura





(g) Adição 7% (REF6)

(h) Pó de filtro (AD)

Fonte: Autoria própria (2025)

É possível verificar a diferença do tamanho das partículas do cimento (Figura 33a) em relação ao pó de filtro (Figura 33h). O pó de filtro alterou o empacotamento das partículas das amostras. No ensaio, observa-se a diferença de blaine do CPV ARI (REF) de $4390 \text{ cm}_2/\text{g}$ e $10500 \text{ cm}_2/\text{g}$. A REF1 apresentou aglomeração e aumento dos vazios.

4.1.4 Análise físico-químico

No ensaio de Chapelle modificado, análise físico-químico, o resultado encontra-se na Tabela 11:

Tabela 11 – Índice de atividade pozoalânica		
	Fenolftaleína (mL)	Índice de atividade pozoalânica (mg/g)
Vfrasco 1	0,50	3,70
Vfrasco 2	0,40	7,39

Fonte: Autoria própria (2025)

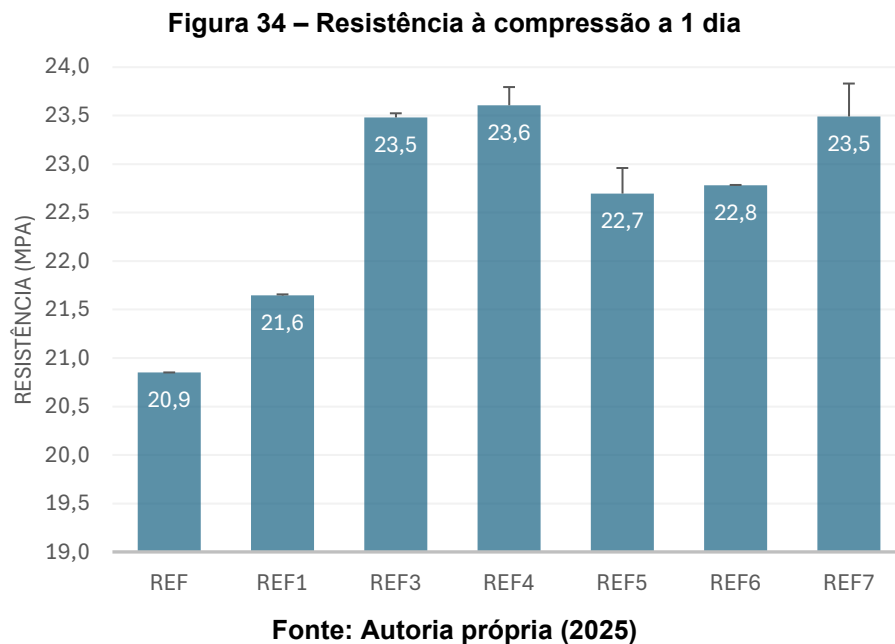
Conforme Raverdy (1980), a reatividade das amostras para aceitação das pozoalanas deve ter consumo mínimo de 330 mg/g . Nos resultados da Tabela 11, foi observado que não há reatividade pozoalânica devido ao índice de atividade.

O ensaio de Chapelle confirma que o pó de filtro é um resíduo inerte, confirmando a análise do MEV onde o teor de sílica é baixo e com isso a capacidade da adição mineral em consumir hidróxido de cálcio, um indicativo da sua atividade pozoalânica.

4.1.5 Análise mecânica

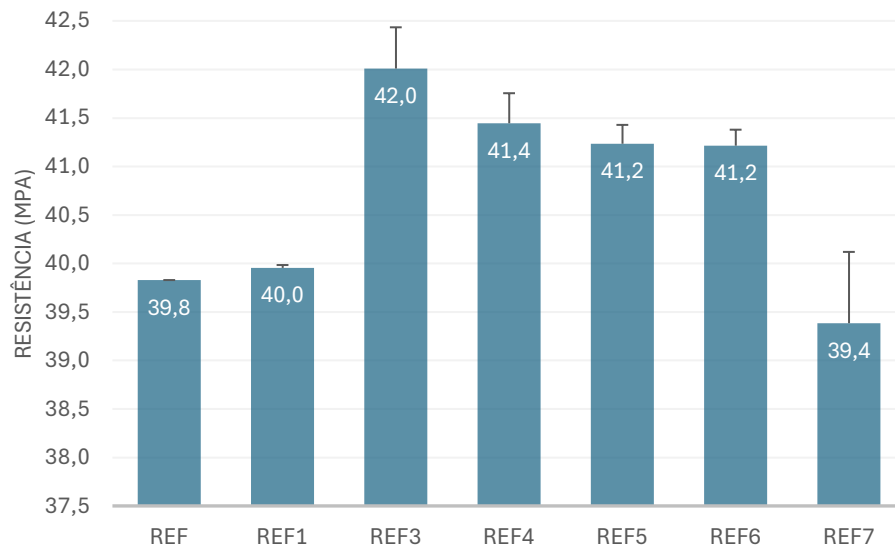
São apresentados os resultados de resistência (média) da pasta de cimento, realizados em dois corpos de prova moldados para cada lote, sendo apresentados a média dos dois valores, atendendo à norma (NBR 16697, 2018).

Para melhor entendimento, os dados foram colocados em figura. Na Figura 34, estão dispostos os resultados do ensaio de compressão referentes a um dia.



No ensaio de compressão referente a 1 dia, constata-se um crescimento na resistência em relação ao REF com as adições de 1% a 7%.

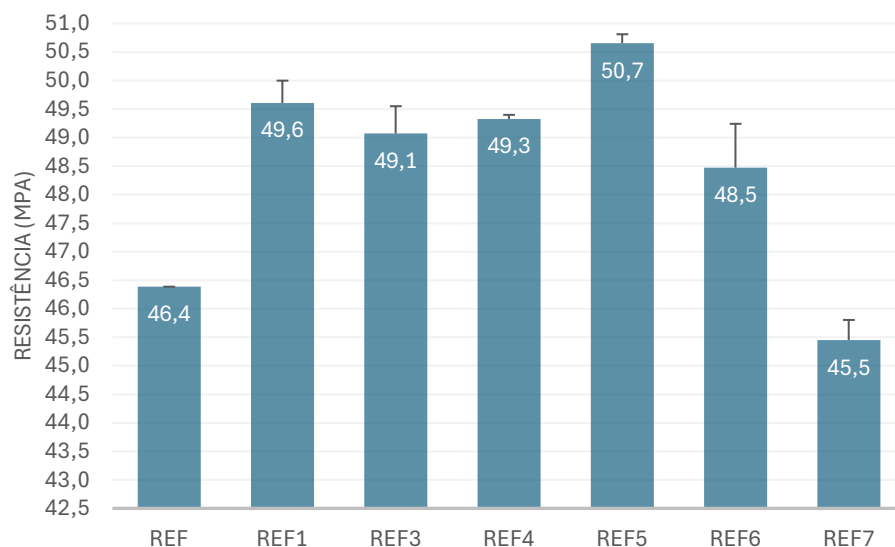
O resultado de 7 dias do ensaio de compressão, é possível analisar o crescimento de desempenho nos primeiros dias (Figura 35).

Figura 35 – Resistência à compressão a 7 dias

Fonte: Autoria própria (2025)

Comparado o resultado a compressão de 1 dia (Figura 34) com o ensaio a compressão em 7 dias (Figura 35), o maior crescimento foi a REF de 91%. Também pode ser notado o crescimento inferior do REF7 de 68%. Nas amostras REF1/REF3/REF4 e REF5, o crescimento foi em torno de 80%. A resistência da amostra REF1 tanto com 1 dia e 7 dias apresentou valores próximos de resistência ao REF.

A resistência à compressão com 28 dias possibilita avaliar o desempenho final das amostras (Figura 36).

Figura 36 – Resistência à compressão a 28 dias

Fonte: Autoria própria (2025)

É possível observar um ganho de resistência de 1, 7 e 28 dias o cimento com adição comparados à referência em praticamente todas as amostras, tendo apenas uma queda representativa na amostra REF7 aos 28 dias.

Na Tabela 12, pode observar a resistência das amostras com adição em relação a REF para cada idade.

Tabela 12 – Comparativo das resistências

Tipo	Resistência a 1 Dia e (%) de crescimento comparado a REF		Resistência a 7 Dias e (%) de crescimento comparado a REF		Resistência a 28 Dias e (%) de crescimento comparado a REF		Crescimento de cada amostra	
	R1 (MPa)	R1 (%)	R7 (MPa)	R7 (%)	R28 (MPa)	R28 (%)	R1 a R7 (%)	R1 a R28 (%)
REF	20,9		39,8		46,4		91	122
REF1	21,6	4	40,0	0	49,6	7	85	129
REF3	23,5	13	42,0	5	49,1	6	79	109
REF4	23,6	13	41,4	4	49,3	6	76	109
REF5	22,7	9	41,2	4	50,7	9	82	123
REF6	22,8	9	41,2	3	48,5	5	81	113
REF7	23,5	13	39,4	-1	45,5	-2	68	93

Fonte: Autoria própria (2025)

Na resistência inicial de 1 dia houve um crescimento de (13%) nas amostras com adição em relação a REF.

Referente a resistência de 7 dias a amostra REF5 ficou (5%) acima a REF e REF ficou abaixo da REF em (-1%).

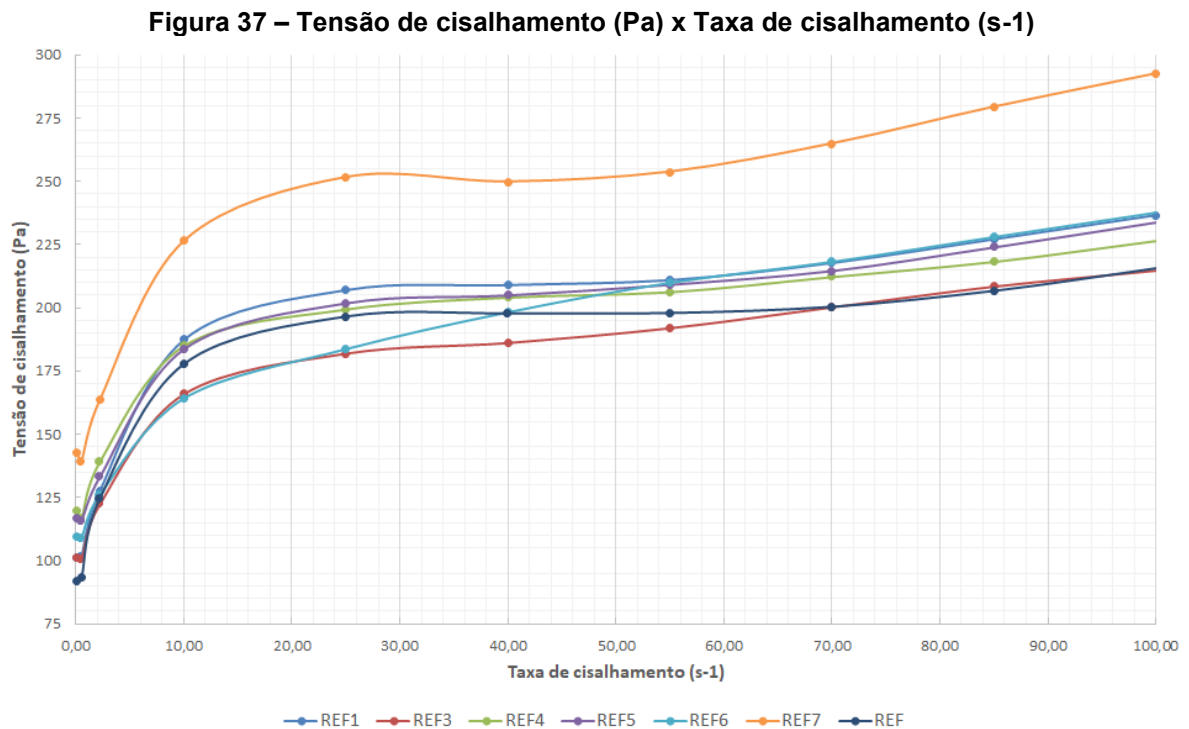
O resultado de 28 dias a REF5 ficou em (9%) acima da REF, seguido de REF1 com (7%) acima da REF. A amostra REF7 apresentou um resultado inferior aos 28 dias em (-2%).

A amostra que houve maior crescimento foi a REF1 com (129%), seguido da amostra REF5 com (123%).

4.2 Reometria

Foi realizado o ensaio de reometria rotacional de fluxo com o equipamento reômetro Thermo Haake Mars.

Na Figura 37, é possível observar o comportamento das amostras analisadas as curvas de tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento.



Fonte: Autoria própria (2025)

A tensão de cisalhamento (τ) do cimento da amostra REF a REF6 variam de 92 a 120 Pa. A tensão de cisalhamento referente à amostra REF7 é 144 Pa superior aos demais.

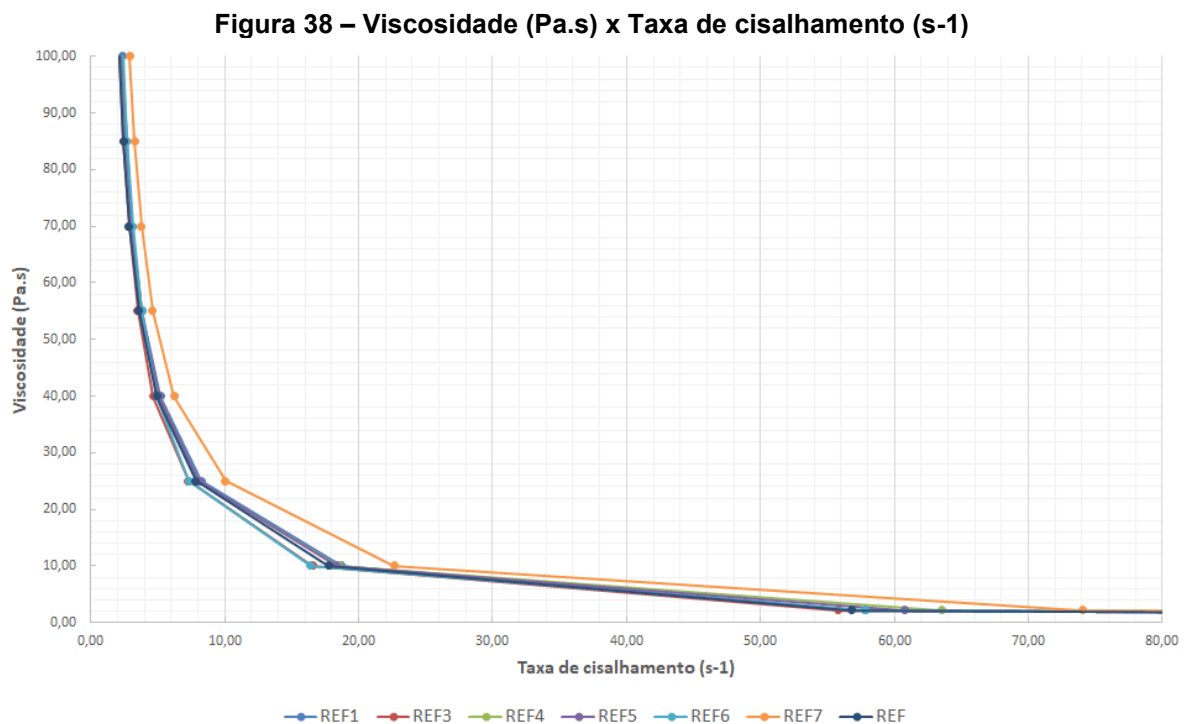
É desejável ter uma baixa tensão de cisalhamento e uma taxa de cisalhamento controlada para otimizar suas propriedades reológicas. Uma baixa tensão de cisalhamento facilita a trabalhabilidade e a colocação do concreto, enquanto uma taxa de cisalhamento adequada garante a homogeneidade e a resistência desejada.

Taxas de cisalhamento ficaram entre 0 e 10 s^{-1} , todas as amostras apresentam um aumento rápido da tensão de cisalhamento. Isso indica uma resistência inicial ao cisalhamento, comum em materiais não newtonianos.

É crescente o aumento da tensão de cisalhamento de acordo com o aumento de adição, excluindo o resultado do REF6 que apresentou comportamento divergente possivelmente por alguma falha no ensaio. A taxa de cisalhamento de 20 s^{-1} , de acordo com a literatura é utilizado em concreto convencional, nesta taxa houve uma diferença de tensão de cisalhamento de 23 Pa do maior a menor.

Concentrações mais baixas (1% a 4%), mostram valores próximos da referência, indicando que essas adições têm um impacto pequeno ou moderado na tensão.

Na Figura 38 é apresentado as curvas da Viscosidade (Pa.s) x Taxa de cisalhamento (s^{-1}).



Fonte: Autoria própria (2025)

A amostra de cimento REF7 resultou em taxas acima das demais, aproximando perto da curva com o aumento da viscosidade (ν). Observe que todas as suspensões apresentam comportamento pseudoplástico, ou seja, um comportamento de viscosidade aparente (Pa.s) diminuindo à medida que a taxa de cisalhamento (s^{-1}) aumenta.

Na Tabela 13, constam os resultados das amostras utilizando os modelos de Herschel-Bulkley, Bingham e Casson.

Tabela 13 – Modelos reológicos

Amostras	Herschel-Bulkley				Bingham			Casson (lin)				Área de histerese (Pa.s)	Unidade	
	τ_0 (Pa)	K	η	R^2	μ (Pa.s)	τ_0 (Pa)	η	R^2	τ_0	η	η_p			R^2
REF	-184,00	304,10	0,0590	0,9792	5,81	129,9	1,038	0,8069	112,3	0,5	0,2061	0,9003	4582	Pa.s
REF1	-12,64	138,70	0,1255	0,9821	3,49	136,7	1,183	0,8451	117,8	0,5	0,2423	0,9261	3926	Pa.s
REF3	49,39	69,12	0,1877	0,9896	2,25	127,3	1,031	0,8821	111,3	0,5	0,1962	0,9526	4445	Pa.s
REF4	51,25	85,84	0,1536	0,9832	2,43	145,6	0,958	0,8563	129,6	0,5	0,1585	0,9370	4247	Pa.s
REF5	61,67	71,99	0,1859	0,9844	2,33	142,9	1,054	0,8727	126,0	0,5	0,1880	0,9464	3726	Pa.s
REF6	89,17	32,36	0,3293	0,9970	1,90	130,9	1,228	0,9340	113,4	0,5	0,2509	0,9838	5054	Pa.s
REF7	80,03	83,00	0,1981	0,9809	2,82	174,4	1,341	0,8768	153,3	0,5	0,2449	0,9462	6201	Pa.s

τ_0 - tensão de escoamento dinâmico (Pa), η - Viscosidade plástica (Pa.s), K - parâmetro consistência, μ - viscosidade (Pa.s), R^2 - coeficiente de determinação, η_p - constante

Fonte: Autoria própria (2025)

A Tabela 13 apresenta os parâmetros reológicos obtidos a partir dos modelos de Herschel-Bulkley, Bingham e Casson para as diferentes amostras analisadas. De modo geral, observa-se que o modelo de Herschel-Bulkley apresentou os maiores coeficientes de determinação (R^2), variando entre 0,9792 e 0,9909, indicando melhor ajuste aos dados experimentais quando comparado aos modelos de Bingham e Casson (Campos et al., 2021).

Apesar do elevado coeficiente de determinação, foram obtidos valores negativos de tensão de escoamento (τ_0) para as amostras REF e REF1 no modelo de Herschel-Bulkley. Esse resultado não possui significado físico para materiais cimentícios, uma vez que tais sistemas apresentam comportamento viscoplástico com tensão de escoamento positiva. Valores negativos geralmente estão associados a limitações do ajuste matemático, faixa inadequada de taxa de cisalhamento ou comportamento do material mais próximo de um modelo de dois parâmetros, como o de Bingham. Dessa forma, para essas amostras, o modelo de Bingham apresenta maior coerência física na determinação da tensão de escoamento (Campos et al. 2021).

Os resultados obtidos pelo modelo de Bingham indicam tensões de escoamento entre 127,3 e 174,4 Pa, valores compatíveis com pastas cimentícias. Observa-se que a amostra REF3 apresentou a menor tensão de escoamento, enquanto a amostra REF7 apresentou o maior valor, indicando maior resistência ao início do fluxo. Essa variação pode estar associada às diferenças na composição e na

distribuição granulométrica das partículas, que influenciam a estrutura interna da pasta (Zhang et al., 2023).

Em relação à viscosidade plástica obtida pelo modelo de Bingham, os valores variaram entre 0,958 e 1,341 Pa·s. A amostra REF4 apresentou a menor viscosidade, sugerindo menor resistência ao escoamento após o início do fluxo, enquanto a amostra REF7 apresentou o maior valor, indicando maior resistência viscosa. Esse comportamento sugere que as modificações nas formulações influenciaram tanto a tensão de escoamento quanto a viscosidade plástica das pastas (Zhang et al., 2023).

Os parâmetros obtidos pelo modelo de Herschel-Bulkley indicam valores do índice de fluxo (n) inferiores a 1 para todas as amostras, variando entre 0,0590 e 0,3293. Esse comportamento caracteriza as pastas como pseudoplásticas, ou seja, materiais cuja viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento, comportamento típico de sistemas cimentícios devido à quebra progressiva das estruturas floculadas sob cisalhamento (Peng et al., 2014).

O modelo de Casson apresentou coeficientes de determinação intermediários, variando entre 0,9003 e 0,9644, com tensões de escoamento entre 111,3 e 153,3 Pa. Esses valores se mostraram fisicamente coerentes e próximos aos obtidos pelo modelo de Bingham, o que reforça o comportamento viscoplástico das amostras e a adequação desses modelos para descrever sistemas cimentícios (Campos et al., 2021).

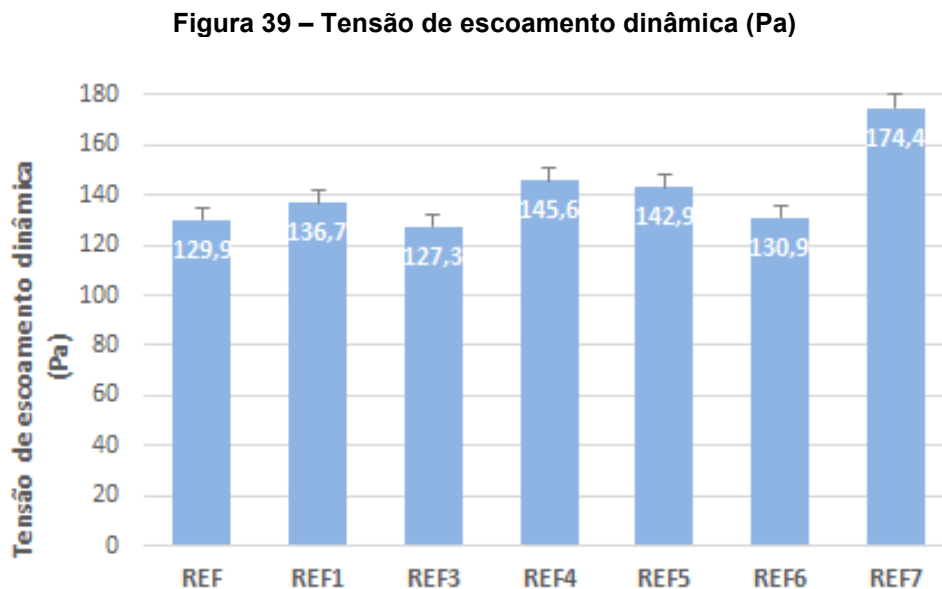
De forma geral, o modelo de Herschel-Bulkley apresentou melhor ajuste estatístico aos dados experimentais, enquanto os modelos de Bingham e Casson forneceram parâmetros de tensão de escoamento fisicamente mais consistentes para todas as amostras. Os resultados indicam que as pastas apresentam comportamento pseudoplástico com tensão de escoamento, típico de materiais cimentícios, sendo a variação dos parâmetros reológicos atribuída às diferenças de composição entre as amostras.

A área de histerese da amostra REF5 foi menor em relação ao REF e às demais. Isso pode estar relacionado à eficiência do processo de mistura, em que uma mistura mais eficiente resulta em menor área de histerese. A amostra REF7 apresentou uma área de histerese superior às demais, isso pode indicar maior dificuldade na quebra de estruturas (aglomerados) dentro da pasta de cimento, necessitando de mais energia para romper essas ligações.

A ASTM C1749 recomenda o uso do Modelo de Bingham (ASTM C1749-17a, 2017). O modelo de Herschel Bulkley não será utilizado devido à tensão de escoamento ter apresentado resultado negativo, por não representar significado físico (Barnes, HA; et al., 1989). Por outro lado, os ajustes segundo Bingham apresentaram o valor de $\eta \sim 1$ que corresponde a um fluido plástico ideal.

Foi utilizado um desvio padrão do estudo de reprodutibilidade da medição reológica com um coeficiente de variação médio de $4,2\% \pm 3,5\%$ para a determinação da tensão de escoamento de Bingham e $8,7\% \pm 6,7\%$ para a determinação da viscosidade de Bingham conforme (Haist et al., 2020).

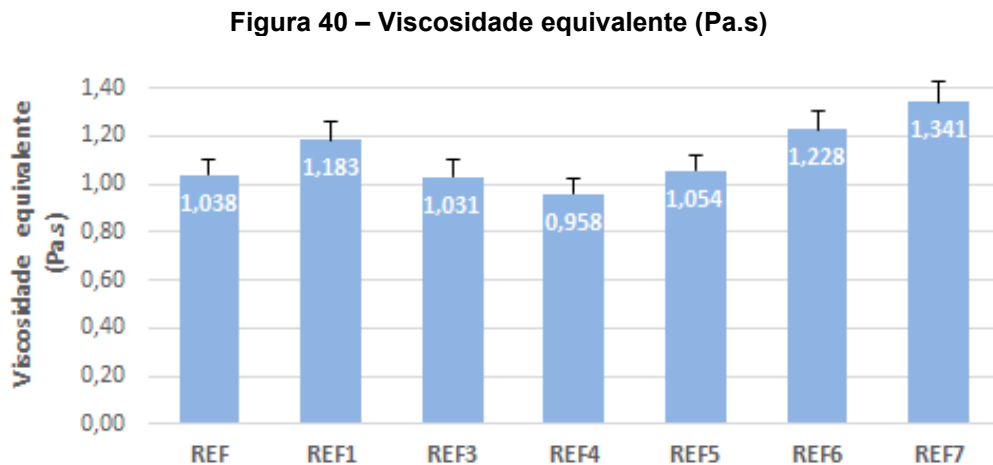
A Figura 39 corresponde à tensão de escoamento pelo modelo de Bingham.



Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se um aumento de 34% na tensão de escoamento da amostra REF7 (174,4 Pa) em relação à amostra REF. As outras amostras apresentaram menores valores de tensão de escoamento, ou seja, maior facilidade para iniciar o escoamento. Fatores como a forma e mineralogia do grão, as forças interpartículas, a rugosidade da partícula, entre outros, também podem influenciar na tensão de escoamento.

Na Figura 40, representa o Modelo de Bingham pode ser observado as viscosidades equivalentes obtidas.



Fonte: Autoria própria (2025)

A viscosidade da amostra REF7 foi 8,4% maior que a da amostra REF6 e 22,59% maior que a da amostra REF. A amostra REF6 ficou 15% acima da amostra REF. As demais amostras REF/REF3/REF4/REF5 obtiveram valores mais próximos. A amostra REF1 resultou valor acima da REF e das demais amostras REF3/REF4 e REF5, confirmando que a adição causou aglomeração aumentando a viscosidade.

Concluindo até o momento, os resultados da amostra REF7 teve maior tensão de cisalhamento, maior viscosidade, maior área de histerese, menor resistência à compressão e granulometria fina próxima da granulometria da adição.

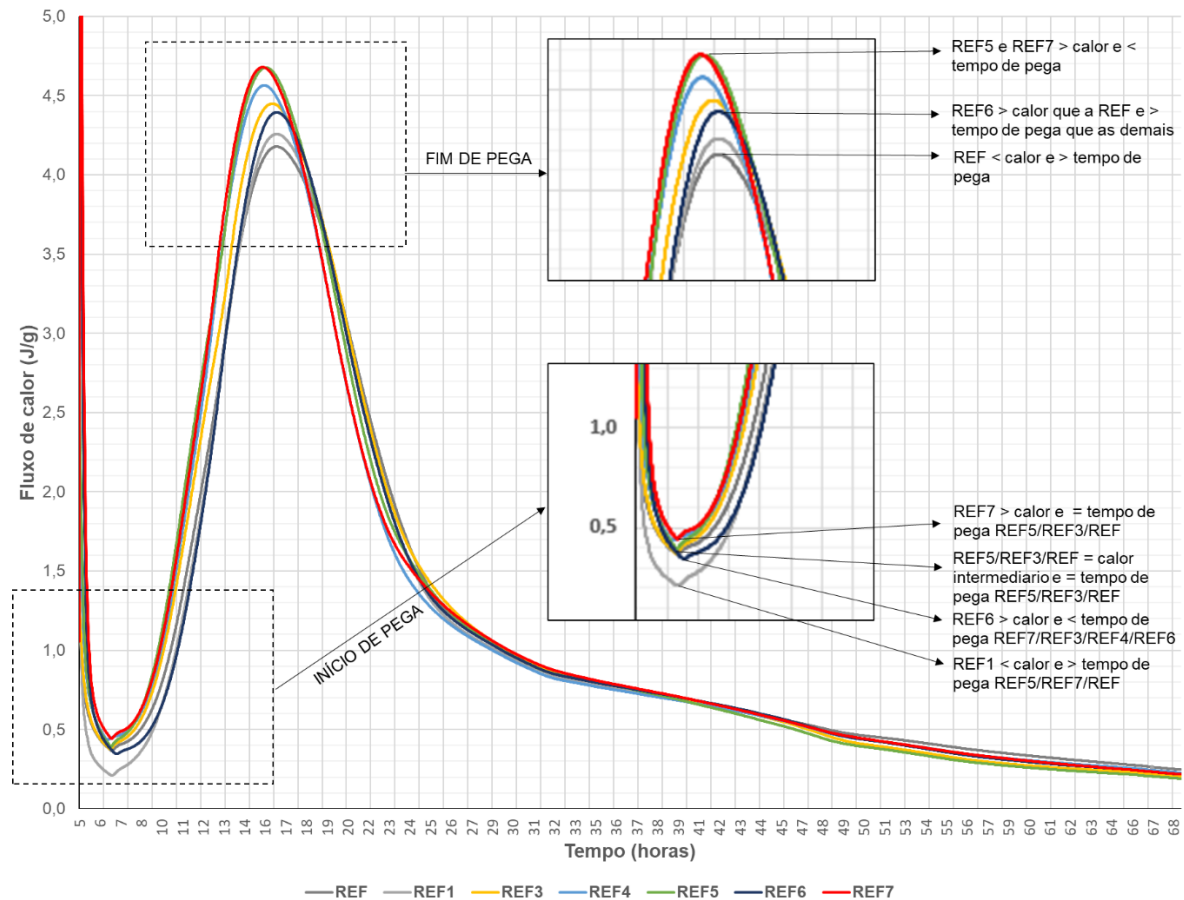
A amostra REF6 teve um desempenho de resistência à compressão de 4% inferior ao REF5, segunda maior área de histerese e com viscosidade equivalente acima dos demais.

A amostra REF5, em suas características, tem o maior blaine, conseqüentemente o melhor desempenho de resistência a 28 dias, menor área de histerese, tensão de cisalhamento de 117 (Pa), melhor referência é 92 (Pa), tensão e escoamento dinâmica e viscosidade equivalente próximo da referência dentro do desvio das amostras.

4.3 Calor de hidratação

Na Figura 41, é apresentado o fluxo de calor de hidratação das amostras.

Figura 41 – Calor de hidratação



Fonte: Autoria própria (2025)

O primeiro parâmetro a se analisar nos resultados é a inclinação da curva de aceleração que está correlacionada com a cinética de hidratação do material. Quanto maior for a inclinação, mais reativo é o material (Quennoz; Scrivener, 2013). Os cimentos com adição apresentam uma inclinação da curva de aceleração parecida e muito próxima à inclinação obtida pelo REF.

O uso da adição aumentou o calor de hidratação e diminuiu o tempo de pega. Na análise do início de pega, a amostra REF7 teve maior fluxo de calor e o menor tempo de pega. As amostras REF/REF1/REF3/REF4 e REF5 mantiveram igual o início de pega. REF1 teve o menor gasto de fluxo de calor.

Na análise de final de pega, REF4/REF5 e REF7 tiveram o menor tempo de pega, sendo o REF5 e REF7 o maior pico de calor.

Quando são analisados estes dados, é possível entender a reação de hidratação do cimento e das resistências das amostras. O REF5 tem menor percentual de C₃S (53,84) e C₄AF (9,33) comparado aos demais amostras, conforme Tabela 6. O

C₃S tem maior importância no resultado da resistência final aos 28 dias e o C₄AF na reatividade e calor de hidratação da pasta de cimento.

4.4 Análise ambiental de emissões de CO₂

Estes dados são referentes à fábrica de Adrianópolis/PR. Nesta análise foi utilizado o uso de 5% de adição (referente a amostra REF5) devido aos resultados apontarem ser o mais adequado. Na tabela 14, resumo dos principais KPIs utilizados para poder avaliar a redução de CO₂ e o reaproveitamentos do resíduo.

Tabela 14– Cálculo de emissões kg CO₂/t

Indicador	Adição de 5%
Clínquer consumido (t)*	98.398,25
Fator clínquer (%)**	83%
Cimento equivalente (t)***	117.952,77
Total MIC (t)****	18.396,93
Emissões específicas (kg CO ₂ /t cem eq.)	714,84

*Média mês (toneladas) Jan-Abril/2025; **(Clk consumido / total ade cimentos); ***(*Prod. Clk / fator de clk %*);
****(*Mat. Primas utilizadas p/ cimento*).

Fonte: Autoria própria (2025)

Não houve redução das emissões de CO₂, neste caso específico, foi substituído filer calcário por pó de filtro em percentuais conforme tabela inicial. O principal fator é a utilização de um resíduo que seria destinado a aterro, assim contribuindo para a economia circular, e foi observado ganho de desempenho, melhorando a resistência da pasta de cimento e as propriedades reológicas.

5 CONCLUSÃO

A utilização do pó de filtro da indústria cimenteira como material cimentício suplementar demonstrou-se tecnicamente viável em baixos teores de incorporação, apresentando influência direta nas propriedades físicas, reológicas, calorimétricas e mecânicas das pastas de cimento.

Os ensaios de caracterização física indicaram aumento da área específica com a incorporação do resíduo, evidenciando o efeito fíler e o melhor empacotamento dos grãos. Esse comportamento foi confirmado nos resultados mecânicos, nos quais a mistura com 5% de pó de filtro apresentou resistência à compressão de 50,7 MPa aos 28 dias, valor aproximadamente 9% superior ao da pasta de referência, que atingiu 46,4 MPa. O ganho de resistência está associado à maior densificação da matriz e ao preenchimento dos vazios promovido pelas partículas finas do resíduo.

Os ensaios reológicos corroboraram para esta análise, uma vez que a mistura com 5% de adição apresentou melhor resultado entre tensão de cisalhamento, viscosidade e área de histerese, indicando comportamento mais estável e adequado às etapas de mistura, transporte e aplicação. Esse resultado confirma que o teor de 5% promove melhor empacotamento das partículas sem comprometer a trabalhabilidade da pasta.

Por outro lado, a incorporação de 7% de pó de filtro resultou em aumento da viscosidade, perda de trabalhabilidade e redução da resistência à compressão para 45,5 MPa aos 28 dias, valor cerca de 2% inferior ao da referência. Esse comportamento indica que o excesso de material fino aumenta a demanda de água e compromete a trabalhabilidade e o desempenho mecânico, estabelecendo um limite técnico para a substituição.

Os ensaios de calorimetria isotérmica confirmaram a influência do resíduo na cinética de hidratação, evidenciando antecipação do pico principal e redução do calor acumulado nas misturas com adição. Esse comportamento indica efeito de nucleação (locais preferenciais para início das reações de hidratação) e maior superfície disponível para as reações, o que contribui para o ganho de resistência inicial observado nas misturas com menores teores de substituição.

A análise integrada dos ensaios demonstra coerência entre os resultados: o aumento da área específica e o melhor empacotamento das partículas influenciaram

positivamente o comportamento reológico, favoreceram a cinética de hidratação e resultaram em ganho de resistência mecânica para o teor de 5%. Em teores superiores, o excesso de finos comprometeu a trabalhabilidade e o desempenho estrutural, evidenciando a existência de um limite técnico de incorporação.

A substituição parcial do clínquer por pó de filtro contribui para a redução do consumo de matérias-primas naturais e das emissões de CO₂ associadas à produção de cimento, além de promover o reaproveitamento de um resíduo gerado no próprio processo industrial, reduzindo a necessidade de disposição em aterros.

De modo geral, os resultados confirmam o potencial do pó de forno de cimento (CKD), também denominado pó de filtro, como material cimentício suplementar em teores de até 5%, conciliando ganho de resistência, comportamento reológico adequado, alteração favorável da cinética de hidratação e benefícios ambientais associados à economia circular.

Como limitações do estudo, destaca-se o número restrito de amostras e a análise em escala laboratorial. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a ampliação dos estudos reológicos, a avaliação em argamassas e concretos e a investigação do comportamento do material em sistemas com coprocessamento.

REFERÊNCIAS

- ABCIC. Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto. Meta da indústria de Cimento é emissão zero de CO2 até 2050.** Disponível em: <<https://abcic.org.br/Noticia/Exibir/meta-da-industria-do-cimento-e-emissao-zero-de-co-ate-2050>. Acesso em: 15 jul. 2025.>.
- ABCP. COP-26: Indústria brasileira se destaca por pioneirismo – Iniciativas de empresas locais na prática de economia de baixo carbono devem atrair investimentos para diversos setores.** Disponível em: <<https://abcp.org.br/cop-26-industria-brasileira-se-destaca-por-pioneirismo/>. Acesso em: 15 jul. 2025.>.
- ABCP. Inventário de gases de efeito estufa é ferramenta importante para indústria reduzir emissões.** Disponível em: <<https://abcp.org.br/inventario-de-gases-de-efeito-estufa-e-ferramenta-importante-para-industria-reduzir-emissoes/#:~:text=Hoje%2C%2080%25%20da%20produção%20nacional,de%20redução%20afirmou%20Visedo.>>>.
- ABNT. NBR 15895. Materiais Pozolânicos - Determinação Do Teor De Hidróxido De Cálcio Fixado - Método Chapelle Modificado. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.No Title. 2010.
- ABNT. NBR 16697:2018. Cimento Portland - Requisitos. 3 jul. , 2018.**
- ABNT. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 12, 2019.
- ABRÃO, P. C. R. A. O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares. p. 144, 2019.
- ADASKA, W. S. et al. BENEFICIAL USES OF CEMENT KILN DUST By : IEEE-IAS Cement Industry Committee. **Distribution**, n. Figure 1, p. 210–228, 2008.
- ADEKUNLE, S. K. Carbon sequestration potential of cement kiln dust: Mechanisms, methodologies, and applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 446, n. January, 2024.
- ALEIXO, D. M. (2011). Influência do cloreto de magnésio na hidratação de cimento Portland para cimentação de poços de petróleo. Dissertação de Mestrado, Habitação: Tecnologia das edificações. - **IPT**, v. pp 200, 2011.
- ANDRADE NETO, J. S. et al. Unveiling the key factors for clinker reactivity and cement performance: A physic-chemical and performance investigation of 40 industrial clinkers. **Cement and Concrete Research**, v. 187, n. September 2024, 2025.
- ASTM C1749-17a:Standard guide for measurement of the rheological properties of hydraulic cementious paste using a rotational rheometer. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS**, 2017.
- AYUB, M. et al. Promoting sustainable cleaner production paradigms in palm oil fuel ash as an eco-friendly cementitious material: A critical analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 295, 2021.
- BANFILL, P. F. G. The rheology of fresh mortar. **Magazine of Concrete Research**, v. 43, n. 154, p. 13–21, 1991.

BARNES, HA; HUTTON, JF; WALTERS, K. Uma introdução à reologia ., **1ª ed.; Elsevier Science BV: Amsterdã, Holanda**, 1989.

BHA. Funcionamento de um filtro de mangas. p. <https://www.youtube.com/watch?v=PWbOyoJ39nE>, 2024.

CAMILA RAQUEL DE LACERDA. INFLUÊNCIA DA COSTURA NA PERFORMANCE DE MEIOS FILTRANTES APLICADOS EM FILTRO DE MANGAS. v. 16, n. 1, p. 1–23, 2022.

CAMPOS, R. S.; MACIEL, G. F. Test protocol and rheological model influence on determining the rheological properties of cement pastes. **Journal of Building Engineering**, v. 44, n. May, p. 103206, 2021.

CASSON N. Flow equation for pigment-oil suspensions of the printing ink-type. **Rheology of disperse systems**, p. cir.nii.ac.jp, 1959.

CEMBUREAU. THE VIEW OF CEMENT SECTOR - Towards Zero Carbon Fuels for Cement Manufacture. p. 1–3, 2016.

CEMBUREAU. Disponível em: <<https://cembureau.eu/policy-focus/environment/circular-economy/>>.

CINCOTTO. **Reações de hidratação e pozolânicas** Concre: Ciência e Tecnologia, , 2022.

DA SILVA, L. S. Indústria Brasileira do Cimento: Consumo e Impactos Ambientais. **Constituindo**, v. 14, n. 1, p. 43–52, 2022.

DORN, T.; BLASK, O.; STEPHAN, D. Acceleration of cement hydration – A review of the working mechanisms, effects on setting time, and compressive strength development of accelerating admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 323, n. November 2021, p. 126554, 2022.

DWECK, J. et al. Evaluating cement hydration by non-conventional DTA: An application to waste solidification. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 71, n. 3, p. 821–827, 2003.

FERNANDES, R. R.; ANDRADE, D. E. V; FRANCO, A. T. Influence of pre-shearing on rheometric measurements of an oil-based drilling fluid. 2017.

FERRARIS, C. F.; OBLA, K. H.; HILL, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 2, p. 245–255, 2001.

FILHO, J. S. et al. Study of the rheology of cement pastes containing ceramic brick wastes end metakaolin. **Revista Materia**, v. 25, n. 1, 2020.

FOLLIARD, K. J.; SCHINDLER, A. K. Influence of supplementary cementing materials on the heat of hydration of concrete. **Advances in Cement and Concrete**, v. n. January, p. 462–472, 2003.

FOUNDATION, E. M. Economia circular em Cidades: pacote de recursos. p. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.or>, 2019.

FOX, R.W., PRITCHARD, P.J., MCDONALD, A.T., 2011. Introdução à Mecânica dos Fluidos. **seventh ed. LTC, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 433–513.**, p. 433–513, 2011.

G H TATTERSALL. The rheology of Portland cement pastes. **G H Tattersall 1955 Br. J. Appl. Phys. 6 165**, v. 165, p. 6–9, 1955.

GALE, J. et al. the CEMENT Industry and Global CLIMATE Change: CURRENT and Potential Future CEMENT INDUSTRY Co2 Emissions. **Greenhouse Gas Control Technologies**, v. II, n. 1, p. 995–1000, 2003.

GCCA. Associação Global de Cimento e Concreto. p. <https://gccassociation.org/cement-industry-net-zero>, 2024.

GERSTIG, M.; WADSÖ, L. A method based on isothermal calorimetry to quantify the influence of moisture on the hydration rate of young cement pastes. **Cement and Concrete Research**. v. 40, n., p. 867–874, 2010.

GIROTTO, L. Cinética da hidratação do aluminato tricálcico cúbico e ortorrômbico na primeira hora: estudo com fases cristalinas sintéticas e extraídas do clínquer Portland. p. 191, 2018.

GUPTA, S.; CHAUDHARY, S. State of the art review on supplementary cementitious materials in India – II: Characteristics of SCMs, effect on concrete and environmental impact. **Journal of Cleaner Production**, v. 357, n. March, p. 131945, 2022.

HABERT, G. et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. **Nature Reviews Earth and Environment**, v. 1, n. 11, p. 559–573, 2020.

HAIST, M. et al. Interlaboratory study on rheological properties of cement pastes and reference substances: comparability of measurements performed with different rheometers and measurement geometries. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 53, n. 4, 2020.

HELENE, P.R.L; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: IBRACON, v. 2v, n. 2, p. 1712p, 2007.

HEWLETT, P. Concrete 's future – significant trends and changes. **UK Concrete Society**, 2004.

HINDS, W. C. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. **John Wiley & Sons**, 1982.

HUERB, N. et al. Effect of thermal treatment of SiC nanowhiskers on rheological , hydration , mechanical and microstructure properties of Portland cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 117, n. December 2020, p. 103903, 2021.

IEA, Intensidade global de energia térmica da produção de cimento, 2023. Disponível em: <www.iea.org/energy-system/industry/cement>.

IMBABI, M. S.; CARRIGAN, C.; MCKENNA, S. Trends and developments in green cement and concrete technology. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 1, n. 2, p. 194–216, 2012.

JARNY, S. et al. Modelling thixotropic behavior of fresh cement pastes from MRI measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 5, p. 616–623, 2008.

JAWED, I.; SKALNY, J. Surface phenomena during tricalcium silicate hydration. **Journal of Colloid And Interface Science**, v. 85, n. 1, p. 235–243, 1982.

JEAN, P.; GLEIZE, P. Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnicas complementares. p. 37–48, 2009.

JUENGER, M. C. G.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. Supplementary cementitious

materials: New sources, characterization, and performance insights. **Cement and Concrete Research**, v. 122, n. May 2019, p. 257–273, 2019.

KANG, R. et al. The effect of gaseous SO₂ secondary sintering on the cement composition and crystal structure. **Construction and Building Materials**, v. 285, p. 122872, 2021.

KAPOOR, K.; SINGH, S. P.; SINGH, B. Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 67–76, 2016.

KESLER. COMPARISON BETWEEN RHEOLOGICAL MODELS FOR PORTLAND CEMENT PASTES. v. 21, n. 4, p. 162, 1985.

KHALIL, E.; ABOUZEID, M. A global assessment tool for cement plants improvement measures for the reduction of CO₂ emissions. **Results in Engineering**, v. 26, n. March, p. 104767, 2025.

KIRCHHERR, J. et al. Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 194, n. April, p. 107001, 2023.

LARRARD, F. ET AL. Evolution of the workability of superplasticized concretes: assessment with the BTRHEOM rheometer. In: **INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE – PRODUCTION METHODS AND WORKABILITY OF CONCRETE, 1996, Paisley/Scotland. Proceedings...** London: E & FN Spon, v. p. 377-388, 1996.

LEA, F. M. The Chemistry of Cement and Concrete. 3rd edn, E. Arnold, London, 1970, 1970.

LIU, M. et al. Effects of colloidal nanoSiO₂ on the hydration and hardening properties of limestone calcined clay cement (LC3). **Construction and Building Materials**, v. 411, n. November 2023, p. 134371, 2024.

MACHADO, J. C. V. Reologia e escoamento de fluidos – Ênfase na indústria do petróleo. Editora Interciência: Engenho Novo. p. Caps. 01, 02 e 03., 2002.

MACOSCO, C. W. Rheology: principles, measurements and applications. **WILEY-VCH Publishers. New York.**, v. 568p, 1994.

MAKI, I.; GOTO, K. Factors Influencing the Phase Constitution of Alite. **Cem**, v. 12, n. 3, p. 301–308, 1982.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, J. P. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo. **IBRACON**, 2014.

MEZGER, T. G. **The Rheology Handbook**. [s.l: s.n.]. v. 38

MONTES-HERNANDEZ, G. Decarbonizing the cement industry is crucial for reducing CO₂ emissions: Myth or reality? **Chemical Engineering Journal**, v. 518, n. May, p. 164995, 2025.

MURTAZA, M. et al. Durability of high strength self-compacting concrete with fly ash , coal gangue powder , cement kiln dust , and recycled concrete powder. v. 449, n. July, 2024.

NAVARRO, R. F. Fundamentos de Reologia de Polímeros. p. p.300, 1997.

NELSON, E. B. W. Cementing. Schlumberger Educational Services. **Saint-Etienne**, 1990.

- NEVILLE, A. M. Tecnologia do concreto. Trad. de Ruy Alberto Cremonini. **Bookman**, v. 2.ed, 2013.
- ODLER, I. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. **4. ed. London: Arnold**, 1998.
- PAPANASTASIOU, T. C. Flows of Materials with Yield. **Journal of Rheology**, v. 31, n. 5, p. 385–404, 1987.
- PENG, J. et al. Rheological models for fresh cement asphalt paste. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 254–262, 2014.
- QUENNOZ, A.; SCRIVENER, K. L. Interactions between alite and C3A-gypsum hydrations in model cements. **Cement and Concrete Research**, v. 44, p. 46–54, 2013.
- RAMACHANDRAN, V. S. (ED.). Concrete admixtures handbook : properties, science, and technology, Park Ridge, Noyes, 1984. 1984.
- RAVERDY, M. ET AL. Appréciation de l'Activité Pouzzolanique de Constituents Secondaires. In: **CONGRÈS INTERNATIONAL DE LA CHIMIE DES CIMENTS, 7., Paris, 1980. Anais... Paris**, p. v. 3, 36-41, 1980.
- Roadmap Tecnológico. p. 1–64, 2019.
- ROUSSEL, N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 10, p. 1797–1806, 2006.
- RUBIO-HERNÁNDEZ, F. J. Rheological behavior of fresh cement pastes. **Fluids**, v. 3, n. 4, p. 1–16, 2018.
- SASANIPOUR, H.; ASLANI, F. Effect of specimen shape, silica fume, and curing age on durability properties of self-compacting concrete incorporating coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 228, 2019.
- SCHNEIDER, M. The cement industry on the way to a low-carbon future. **Cement and Concrete Research**, v. 124, n. August, 2019.
- SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. A. Practical guide to microstructural analysis of cementitious materials. [s.l.] Crc Press. 2018.
- SHOAEI, P. et al. Investigation of adding cement kiln dust (CKD) in ordinary and lightweight concrete. **Advances in Concrete Construction**, v. 5, n. 2, p. 101–115, 2017.
- SIDDIQUE, R. et al. Influence of bacteria on compressive strength and permeation properties of concrete made with cement baghouse filter dust. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 461–469, 2016.
- SILVESTRO, L. et al. Rotational rheometry test of Portland cement-based materials – A systematic literature review. **Construction and Building Materials**, v. 432, n. May, p. 136667, 2024a.
- SILVESTRO, L. et al. Assessing the effect of test parameters on the determination of the rheological behavior of calcium sulfoaluminate cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 425, n. March, p. 135975, 2024b.
- SNIC. SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Roadmap Tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro, 64 p. 2019. **ABCP**, p. 64p, 2019.

- SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. p. <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>, 2022.
- STAHSEL, W. R. The circular economy. **Nature**, v. 531, n. 7595, p. 435–438, 2016.
- STANĚK, T.; SULOVSÝ, P. The influence of the alite polymorphism on the strength of the Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 7, p. 1169–1175, 2002.
- STATISTA. Major countries in worldwide cement production in 2023. 2024.
- TAYLOR, H. F. W. Cement Chemistry. Londres: **Academic Press Limited**, 1990.
- TAYLOR, H. F. W. Cement chemistry. **Thomas Telford Ltd**, v. v. 20, n.4, p. 335, 1997.
- TSAI, D. et al. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil**.
- TURNER, J. H; MCKENNA, J. D; MYCOCK, J. C.; NUNN, A. B.; VATAVUK, W. M. Particulate Matter Controls: baghouses and filters. In: **Handbook of Air Pollution Technology**. New York, 1998.
- ULLAH, S. et al. Numerical Analysis of Temperature and Stress Fields in Mass Concrete Based on Average Forming Temperature Method. **Undefined**, 2025.
- V. S. RAMACHANDRAN, J. J. BEAUDOIN, J. J. H. Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology Principles, Techniques and Applications. **Elsevier Science**, [s.d.].
- VÖLKER, T.; KOVACIC, Z.; STRAND, R. Indicator development as a site of collective imagination? The case of European Commission policies on the circular economy. **Culture and Organization**, v. 26, n. 2, p. 103–120, 2020.
- VOLLSET, S. E. et al. Fertility, mortality, migration, and population scenarios for 195 countries and territories from 2017 to 2100: a forecasting analysis for the Global Burden of Disease Study. **The Lancet**, v. 396, n. 10258, p. 1285–1306, 2020.
- WADSÖ, L. An experimental comparison between isothermal calorimetry , semi-adiabatic calorimetry and solution calorimetry for the study of cement hydration. **Nordtest Tekniikantie**, 2003.
- WALLEVIK, O. H. et al. Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 100–109, 2015.
- WBCSD.WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Guidelines for co-processing fuels and raw materials in cement manufacturing.** Disponível em: <https://docs.wbcsd.org/2015/10/CSI_Co-Processing_Fuels_and_Raw_Materials.pdf. Genebra, 2014>.
- WINDEUROPE. Position paper: Cement co-processing is a sustainable solution for recycling end-of-life composite materials. n. June, p. 1–5, 2023.
- WORRELL, E. et al. Missions from * the. **Carbon**, v. 26, p. 303–329, 2001.
- XI, X. et al. Study on the hydration characteristics, mechanical properties, and microstructure of thermally activated low-carbon recycled cement. **Construction and Building Materials**, v. 447, n. August, p. 138042, 2024.
- XIE, Y. et al. Hydration heat and microstructure of SCM-blended cement under semi-

adiabatic conditions: Effect of initial temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 356, n. September, p. 129329, 2022.

ZHANG, C. et al. Rheological properties of cement-based slurry and evaluation of rheological model: Influence of particle size and shape. **Construction and Building Materials**, v. 406, n. June, p. 133498, 2023.

ZHOU, H. et al. Research on the formation of M1-type alite doped with MgO and SO₃—A route to improve the quality of cement clinker with a high content of MgO. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 156–166, 2018.

ZHOU, H. et al. Research on structure modulation of alite and its effect on the mechanical properties of cement clinker. **Construction and Building Materials**, v. 303, n. June, p. 124511, 2021.